

**Untersuchungen an Einschraubverbindungen
für hochgefüllte, extrudierte Holz-Polymer-Werkstoffe
zum Einsatz in der Fördertechnik**

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)
vorgelegt

von **Dipl.-Ing. Christine Schubert**
geboren am 26.04.1988 in Stollberg/ Erzgeb.

Tag der Einreichung: 21.08.2019

Tag der Verteidigung: 05.02.2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel, Technische Universität Chemnitz
Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, Technische Universität Dresden

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. habil. Sophie Gröger, Technische Universität Chemnitz

Bibliografische Beschreibung

Schubert, Christine

Untersuchungen an Einschraubverbindungen für hochgefüllte, extrudierte Holz-Polymer-Werkstoffe zum Einsatz in der Fördertechnik

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Professur Förder- und Materialflusstechnik, Chemnitz, 2019

171 Seite, 79 Bilder, 21 Tabellen, 169 Literaturzitate

Referat

Extrusionsprofile aus hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen sind u. a. wegen ihres vorteilhaften tribologischen Verhaltens in der Fördertechnik interessant. Sie besitzen das Potential kunststoffbasierte Gleitleisten und aluminiumbasierte Gestellprofile zu substituieren. Für deren Anwendung in der Baugruppe und als Anbauteil in fördertechnischen Anlagen sind Direktverschraubungen und Quergewindebolzen-Steckschraubverbindungen als vorgespannte Einschraubverbindungen relevant. Für das Verschrauben von WPC-Bauteilen mittels Einschraubverbindungen fehlen bislang konstruktive Gestaltungsempfehlungen und Montagehinweise, um die sichere Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten. Hier knüpft die Zielstellung dieser Arbeit an.

Im Grundlagenteil werden werkstofftypische Einflussfaktoren von WPC beschrieben und relevante Einschraubverbindungen branchenübergreifend vorgestellt. Mittels Montageversuche und Schraubenauszugsversuche werden in dieser Arbeit die vorteilhaften konstruktiven Parameter beider Einschraubverbindungen herausgearbeitet. Für die Direktverschraubung sind das die Gewindegeometrie, der Kernlochdurchmesser die Einschraublänge sowie die Bauteildimension. Für die QGB-Steckschraubverbindung sind es der Bolzendurchmesser, die Eindringtiefe und die Bauteildimension. Hierbei werden die Einflüsse der Einschraubrichtung, des WPC-Werkstoffes und die Feuchtigkeitsaufnahme mit berücksichtigt. Auf Basis der erarbeiteten konstruktiven Verbindungsparameter wird der Verlust der Vorspannkraft beider Schraubverbindungen in Langzeitversuchen abgebildet. Dabei fließen zwei Klimaszenarien in diese Messung mit ein. Abschließend wird mit dem Nachziehen der Schraubverbindung eine Montagestrategie aufgezeigt, den Vorspannkraftverlust in der Schraubverbindung von WPC zu reduzieren.

Schlagworte

Holz-Polymer-Werkstoffe, Einschraubverbindung, Direktverschraubung, Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung, Fördertechnik, Extrusionsprofile, Gestellprofile, konstruktive Gestaltung, Montageempfehlung, Nachziehen, Feuchtigkeitseinfluss

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Professur Förder- und Materialflusstechnik des Instituts für Fördertechnik und Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel, Leiter der Professur Fördertechnik bis 2017, danke ich sehr für die Betreuung der Arbeit als Doktorvater.

Herrn Prof. Dr.-Ing. André Wagenführ, Inhaber der Professur für Holztechnik und Faserwerkstofftechnik der Technischen Universität Dresden, danke ich recht herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens und hilfreichen Hinweisen.

Für unterstützende Diskussionen bei der Themenfindung danke ich meinen Kollegen der Arbeitsgruppe „Anwendungstechnik erneuerbarer Werkstoffe“, besonders Herrn Dr.-Ing. Sven Eichhorn und Herrn Dr.-Ing. Ronny Eckardt.

Weiterhin danke ich der Firma NOVO-TECH GmbH & Co. KG für die Bereitstellung des Versuchsmaterials und der Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe e.V. für die Unterstützung der experimentellen Untersuchungen im Rahmen des FuE-Projektes

„Lösbare Verbindungstechnik für Bauteile aus Wood Polymer Composite (WPC) unter dynamischen Belastungen“ (FKZ: 22001814).

Am Ende ist es die Arbeit eines Einzelnen, welche aber ohne fachliche Gespräche, kritische Diskussionen, herzlichen Ablenkungen, Korrekturen und unterstützenden Tätigkeiten zur Versuchsumsetzung vieler Kollegen nicht möglich wäre. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Andreas Kretschmer, Herrn Andreas Felber, Herrn Moritz Pfretzschner, Herrn Dr.-Ing. Christoph Müller, Herrn Ralf Gießbach, Herrn Michael Schwipper, Herrn Tino Grunert, Frau Sabine Preißler und Frau Ulrike Schneevoigt bedanken.

Recht herzlich danke ich Frau Annett Schmieder, die mir über manche grafischen Probleme hinweg geholfen hat und eine stete Unterstützung während meiner Promotionszeit war.

Für aufbauende Worte und Mutzusprache während meiner gesamten Promotionszeit danke ich ebenfalls meiner Familie und meinen Freunden.

Christine Schubert

Chemnitz, im März 2020

„Nach fest kommt ab“, „ratatat“

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Kurzzeichen	Erklärung
Al	Aluminium
B1	Brandschutzklasse „schwer entflammbar“ nach DIN 4102-1
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS	Spezialschraube für Duroplaste
DSV	Durchsteckschraubverbindung
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESV-GFS	Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben
ESV-QGB	Einschraubverbindung als Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung
FK	Festigkeitsklasse
Gew.-%	Gewichtsprozent
GLP	GreenLogisticPlant
HB	Holzbau
Hb	Hardboard (dt. Harte Faserplatte)
HS	Spezialschraube für Holz
KMR	Kraftmessring
KT	Kunststofftechnik
MB	Möbelbau
MDF	Mitteldichte Faserplatte
MS	Spezialschraube für Leichtmetalle
MW	Mittelwert
NFK	Naturfaserkunststoff
OSB	Oriented Strand Board
P-SE	Plattenrichtung, senkrecht zur Extrusionsrichtung
PA6-GF30	Polyamid 6 mit 30 % Glasfaserverstärkung
PB	Particleboard (dt. Spanplatte)
PE UHMW	Polyethylen ultrahochmolekular
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PE-LD	Polyethylen geringer Dichte
PLY	Plywood (Sperrholz)
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid

QGB	Quergewindebolzen
rel. LF	relative Luftfeuchtigkeit
S-PE	Scheibenrichtung, parallel zur Extrusionsrichtung
S-SE	Scheibenrichtung, senkrecht zur Extrusionsrichtung
SA	Stiftachse
TS	Spezialschraube für Thermoplaste
VBM	Verbindungsmittel
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WPC	Wood Plastic Composite
WPC-1	Wood Plastic Composite, Hersteller 1
WPC-5	Wood Plastic Composite, Hersteller 5
WPC-6	Wood Plastic Composite, Hersteller 6
WVC	Wood Veneer Composite

Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
A	mm ²	Querschnittsfläche
A _{ef}	mm ²	effektiv im Grundwerkstoff verankerte Gewindefläche
A _{proj}	mm ²	projizierte Fläche
A _S	mm ²	Schraubenquerschnitt
A _{ver}	mm ²	Verankerungsfläche beider Einschraubverbindungen
a	mm	Kantenlänge Würfel
a ₁	mm	Kantenlänge Würfel vor der Kaltwasserlagerung
a ₂	mm	Kantenlänge Würfel nach der Kaltwasserlagerung
a ₃	mm	Mindestrandabstand
B	mm	Bauteilbreite in Direktverschraubung
b _G	mm	verankerte Gewindeflankenbreite
d	mm	Durchmesser allgemein
D ₁	mm	Bolzendurchmesser
d ₁	mm	Schraubinnenndurchmesser
D ₂	mm	Durchmesser Stirnlochbohrung
d ₃	mm	Innendurchmesser Holzschraubgewinde nach DIN 7998
d _A	mm	Außendurchmesser Einschraubtubus
D _i	mm	Innendurchmesser axiales Rillenkugellager
d _K	mm	Kernlochdurchmesser

dM	Nm	Momentendifferenz
e	mm	Eindringtiefe
E ₀	N/mm ²	E-Modul elastisch
E _b	N/mm ²	Biege-E-Modul
E _{rel}	N/mm ²	E-Modul relaxierend
E _Z	N/mm ²	Zug-E-Modul
f	Hz	Prüffrequenz
F	N	Kraft
f _L	mm	Längenänderung
F _{ax}	N	statische Auszugskraft
f _{ax}	N/mm ²	statischer Ausziehparameter
F _B	N	Betriebskraft
F _K	N	Klemmkraft
F _{max}	N	Maximalkraft
F _{PB}	N	Bauteilzusatzkraft
f _{PV}	mm	Elastische Stauchung des Bauteils
F _S	N	Schraubenkraft
F _{SB}	N	Schraubenzusatzkraft
f _{SV}	mm	elastische Längung der Schraube
F _V	N	Montagevorspannkraft, Vorspannkraft
F _{V_soll}	N	geforderte Montagevorspannkraft für t = 10 Jahre
F _{v(t=0)}	N	Anfangsvorspannkraft
F _{v(t=1)}	N	Vorspannkraft zum Zeitpunkt 1
F _{v(t=2)}	N	Vorspannkraft zum Zeitpunkt 2
F _{vmax}	N	maximal übertragbare Montagevorspannkraft
H	%	Feuchtegehalt nach DIN EN 322
K	N/mm ²	Druckmodul
k	-	Faktor Abschaltgenauigkeit Schraubgerät
k _{mond}	-	Modifikationsbeiwert Eurocode 5
L	mm	Probenlänge
l	mm	Ausgangslänge
l _s	mm	Schraubenlänge
L _B	mm	Bolzenlänge
l _d	mm	Eindringtiefe des Verbindungsmittels nach DIN EN 1382
l _E	mm	Einschraublänge
l _{Emax}	mm	maximale Einschraublänge

m	-	Werkstoffkonstante 1 Findleyansatz
M_1	Nm	Drehmoment 1
M_2	Nm	Drehmoment 2
M_A	Nm	Anzugmoment
M_{SB}	Nm	Bruchmoment Schraube
M_E	Nm	Eindrehmoment
$M_{E_{\max}}$	Nm	maximales Eindrehmoment
M_F	Nm	Gewindeformmoment
M_{KR}	Nm	Kopfreibmoment
M_R	Nm	Gewindereibmoment
$M_{\ddot{U}}$	Nm	Überdrehmoment
$M_{\ddot{U}_{\min}}$	Nm	minimales Überdrehmoment
N	-	Anzahl der Einzelmessung
n	U/min	Drehzahl
n_A	U/min	Drehzahl Schraubenanzug
n_E	U/min	Drehzahl Eindrehen der Schraube
N_1	-	Nachziehen 1
N_2	-	Nachziehen 2
N_3	-	Nachziehen 3
p	-	Werkstoffkonstante 2 Findleyansatz
P	mm	Gewindesteigung
R_1	-	Relaxationsintervall 1
R_2	-	Relaxationsintervall 2
R_3	-	Relaxationsintervall 3
r_A	mm	Gewindeaußenradius
r_B	mm	Radius der Vorbohrung, bzw. Kernlochradius
r_m	mm	mittlerer Radius
R_d	N	Auszieh Widerstand
R_e	N/mm ²	Streckgrenze
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm ²	0,2%-Dehngrenze
s_G	mm	Länge des abgewickelten Gewindeganges
T	°C	Temperatur
T_G	°C	Glasübergangstemperatur
T_M	°C	Kristallisationstemperatur
t_s	s	Zeit

t_1	s	Zeitpunkt 1
t_2	s	Zeitpunkt 2
t	mm	Bauteildicke
t_{red}	mm	reduzierte Bauteildicke
t_G	-	Anzahl verankerter Gewindegänge
U	mm	Umfang
v	mm/min	Prüfgeschwindigkeit
V_{FL}	mm	Verankerungslänge entlang einer Gewindeflanke
w	mm	Bauteilbreite in QGB-Verbindung

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
α	°	Drehwinkel
α_1	°	Drehwinkel 1
α_2	°	Drehwinkel 2
α_F	°	Faserlastwinkel
α_Q	%	Quellmaß
δ	mm/N	Nachgiebigkeit
ΔF_v	N	Änderung der Vorspannkraft
Δt	s	Zeitänderung
ε	%	Dehnung
ε_0	%	Dehnung elastisch
ε_b	%	Biegedehnung
$\varepsilon_{\text{entl}}$	%	Dehnung entlastet
ε_{ges}	%	Dehnung gesamt
ε_{rel}	%	Dehnung relaxierend
ε_v	%	Dehnung viskos
ε_z	%	Bruchdehnung Zug
η_0	Pa s	Viskosität
η_{rel}	Pa s	Viskosität relaxierend
μ	-	Reibwert
π	3,14159...	Kreiszahl
ρ	g/cm ³	Dichte
σ	N/mm ²	Spannung
σ_0	N/mm ²	Spannung elastisch

σ_b	N/mm ²	Biegefestigkeit
σ_D	N/mm ²	Druckfestigkeit
σ_L	N/mm ²	Lochleibungsfestigkeit
σ_x	N/mm ²	Zugfestigkeit x-Richtung
σ_y	N/mm ²	Zugfestigkeit y-Richtung
σ_z	N/mm ²	Zugfestigkeit
τ	s	Relaxationszeit
τ_{xy}	N/mm ²	Scherfestigkeit
φ	°	Steigungswinkel

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	13
2 Stand der Technik und Grundlagen.....	14
2.1 Definition und Normung.....	14
2.2 Einteilung WPC-Bauteile nach Herstellungsverfahren.....	14
2.3 Direktextrusion von WPC-Profilen.....	15
2.4 Werkstofftypische Einflussfaktoren von WPC.....	17
2.5 WPC-Extrusionsprofile in technischen Anwendungen.....	24
2.6 Lösbare Verbindungstechnik von WPC-Extrusionsprofilen.....	27
2.7 Einschraubverbindung der Holz-, Kunststofftechnik und des Maschinenbaus.....	29
2.7.1 Einführung.....	29
2.7.2 Einschraubverbindung des klassischen Maschinenbaus.....	30
2.7.3 Holzschraubverbindung.....	35
2.7.4 (Kunststoff-) Direktverschraubung.....	41
2.7.5 Steckschraube-Quergewindebolzenverbindung.....	52
2.7.6 Vergleich der Einschraubverbindungen.....	55
2.8 Einschraubverbindungen in WPC	57
3 Problem- und Zielstellung.....	61
4 Versuchsprogramm.....	63
5 Experimentelle Untersuchungen.....	67
5.1 Untersuchte Werkstoffe.....	67
5.2 Probekörper.....	70
5.3 Probekörperkonditionierung.....	71
5.4 Verbindungsmittel.....	72
5.5 Verbindungsaufbau.....	74
5.6 Verschraubungsprüfstand.....	74
5.6.1 Schraubeinheit und vorspannkraftgeregelte Spindelabschaltung	75
5.6.2 Ringkraftsensoren und Messverstärker.....	76
5.6.3 Probenaufnahme.....	76
5.7 Montageversuche.....	77

5.8 Statischer Auszugsversuch ohne Vorspannkraft.....	78
5.9 Statischer Auszugsversuch mit Vorspannkraft.....	81
5.10 Nachziehversuche.....	83
5.11 Kontinuierliche Vorspannkraftrelaxationsmessung	84
5.11.1 Aufbau, Messtechnik, Extrapolation.....	84
5.11.2 Vorspannkraftmessung bei zunehmender Materialfeuchtigkeit.....	85
5.11.3 Vorspannkraftmessung mit Schraubennachzug.....	86
5.12 Mikroskopische Analyse.....	86
6 Ergebnisse.....	88
6.1 Konstruktive Einflüsse der Direktverschraubung.....	88
6.1.1 Schraubengeometrie.....	88
6.1.2 Kernlochdurchmesser.....	92
6.1.3 Einschraublänge in Abhängigkeit von der Einschraubrichtung.....	94
6.1.4 Bauteildicke t und Bauteilbreite B	97
6.2 Konstruktive Einflüsse der QGB-Steckschraubverbindung.....	100
6.2.1 Bolzendurchmesser D_1 und Eindringtiefe e	101
6.2.2 Bauteilbreite w	103
6.2.3 Bauteildicke t	104
6.2.4 Einfluss Holz-Polymer-Werkstoff und Einschraubrichtung	106
6.3 Montagetechnische Einflüsse.....	108
6.3.1 Montagedrehzahl.....	108
6.3.2 Nachziehen der Schraubverbindung.....	110
6.4 Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf den Montageprozess	115
6.4.1 Einführung.....	115
6.4.2 Sorptionsverhalten der WPC-Werkstoffe.....	115
6.4.3 Direktverschraubung.....	118
6.4.4 Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung.....	121
6.5 Schraubverbindungen im Betriebszustand.....	122
6.5.1 Statische Auszugskraft im vorgespannten Zustand.....	122
6.5.2 Vorspannkraftverlauf beider Einschraubverbindungen.....	123

6.5.3 Vorspannkraftverlauf bei unterschiedlicher Materialfeuchtigkeit	125
6.5.4 Vorspannkraftverlauf nachgezogener Schraubverbindungen.....	130
7 Diskussion.....	133
7.1 Empfehlung zur konstruktiven Gestaltung.....	133
7.2 Empfehlung maximaler Anzugmomente und Vorspannkräfte.....	137
7.3 Montageempfehlungen.....	138
7.4 Bewertung der Einflussfaktoren.....	141
7.4.1 Einfluss der Anisotropie auf die Einschraubrichtung.....	141
7.4.2 Einfluss der Materialfeuchtigkeit.....	142
7.5 Konstruktionsbeispiele.....	145
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	148
9 Literaturverzeichnis.....	151
10 Abbildungsverzeichnis.....	163
11 Tabellenverzeichnis.....	169
12 Anhang.....	171

1 Einleitung

„Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe sind Verbundwerkstoffe, die aus unterschiedlichen Anteilen an (ligno)zellulosehaltigen Materialien, Kunststoffen und Additiven bestehen“ [Car15, S. 15]. In dieser Arbeit wird die Bezeichnung Holz-Polymer-Werkstoffe bzw. WPC verwendet. „WPC lässt sich durch kunststofftechnische Formgebungsverfahren verarbeiten“ [Car15, S. 15]. WPC-Extrusionsprofile haben sich seit mehreren Jahren als Terrassendecks im Außenbereich etabliert. In dieser Anwendung substituieren sie Vollholzbretter (z. B. Tropenholz) aufgrund ihrer geringeren Wasseraufnahme, geringer Splitterneigung und höheren Dimensionsstabilität [Sch13]. Die Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe e.V. deklariert WPC-Terrassendecks mit mindestens 50 Gew.-% Holz als Holzwerkstoff, wenn die in [NN17] beschriebenen physikalischen Eigenschaften erreicht werden. Der Motivation WPC-Extrusionsprofile in der technischen Intralogistik einzusetzen liegen ökologische, technische und wirtschaftliche Punkte zugrunde. WPC, mit seiner Hauptkomponente Holz reiht sich als nachhaltiger Werkstoff in die Green-LogisticPlant (GLP) [Eic12a] ein. WPC ist aufgrund seiner thermoplastischen Matrix zu 100% stofflich recyclebar und kann als „Umlaufmaterial in die Produktionslinie zurückgeführt“ werden [NN15]. Fördertechnik in Holzbauweise findet wachsende Anwendung in Logistiksystemen der Automobilproduktion beispielsweise als Skidförderer für Karosserien im VW-Werk Wolfsburg [Eck10, Eck14]. Hochgefüllte WPC-Extrusionsprofile sind wegen ihrer Eigenschaftskombination aus guten mechanischen Eigenschaften, hoher Gestaltungsfreiheit durch einfache 3D-Formgebung und dem vorteilhaften tribologischen Verhalten [Eic09, Eic12] für technische Anwendungen in der Fördertechnik von Interesse. Sie erfüllen die wachsenden Anforderungen an technischer Funktionsintegration, Nachhaltigkeit, stofflicher Wiederverwertung und Wirtschaftlichkeit als Konstruktionswerkstoff für geringe bis mittlere Lasten. Die Einschraubverbindung, als lösbare Füge-technik, ist der elementare Bestandteil die Profile in bestehende Förderanlagen einbauen bzw. flexible Gestellprofile montieren zu können. Neben dem reproduzierbaren Extrusionsprozess der WPC-Profile muss die Einschraubverbindung optimal an den Werkstoff angepasst sein. Mangelnde Montagevorschriften und fehlende Untersuchungen der werkstoffspezifischen Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit der Einschraubverbindung führen derzeit zum vorzeitigen Versagen der Verbindungsstelle während der Montage und im Betrieb. Um die geforderte Tragfähigkeit der Einschraubverbindung sicherzustellen, ist die Überdimensionierung der Verbindungsstelle die Folge.

Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Wirkung der Einflussfaktoren auf den Fügeprozess und die Tragfähigkeit von vorgespannten Einschraubverbindungen in hochgefüllten, extrudierten Holz-Polymer-Werkstoffen im Einsatzfeld der Fördertechnik zu erarbeiten. Auf Basis des erarbeiteten Forschungsstandes aus der Holzbau-, Möbel- und Kunststoffbranche wird die Zielstellung der Arbeit in Kapitel 3 konkretisiert.

2 Stand der Technik und Grundlagen

2.1 Definition und Normung

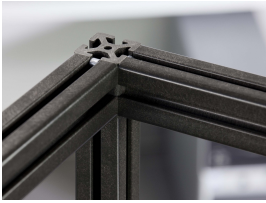


„Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (engl. Wood Plastic Compound kurz: WPC) sind Verbundwerkstoffe, die aus unterschiedlichen Anteilen an (ligno)zellulosehaltigen Materialien, Kunststoffen und Additiven bestehen“ [Car15, S. 15]. Am häufigsten werden WPC-Werkstoffe auf Basis der Massenkunststoffe Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt. Gemäß DIN EN 15534 werden WPC-Werkstoffe weder als gefüllte Kunststoffe noch als eine spezielle Art von Holz betrachtet. Es wird empfohlen sie als eigenständigen Werkstoff mit spezifischen Eigenschaften zu sehen [DIN5534]. Die Normung DIN EN 15534-1 bis 3 umfasst „Prüfverfahren und Eigenschaften für die Beschreibung von WPC-Werkstoffen und Erzeugnissen“. Diese Bestimmungen wurden 2014 auf Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltige Materialien für die Formteile Wandbekleidung und Bodenbeläge erweitert [DIN EN 15534-4, DIN EN 15534-5]. Da der Werkstoff sowohl Eigenschaften von Holz als auch Thermoplast vereint, greift die Normung auf bestehende Prüfnormen der Holz- und Kunststoffbranche zurück. Konkrete, mit Zahlenwerte hinterlegte Anforderungen werden im Gütesiegel für WPC von der Qualitätsgemeinschaft für Holzwerkstoffe definiert, sodass ein gewisser Qualitätsstandard der in Deutschland produzierten WPC-Werkstoffe vorliegt [NN17]. Im Rahmen dieser Arbeit wird teilweise auf die entsprechende Holz- und Kunststoffnormung zurückgegriffen, wobei der Fokus auf den Regularien des Gütesiegels für WPC liegt.

2.2 Einteilung WPC-Bauteile nach Herstellungsverfahren

Die in dieser Arbeit betrachteten thermoplastischen WPC-Bauteile lassen sich hinsichtlich ihres Formgebungsverfahrens in Spritzguss-, Extrusions- und Pressbauteile einteilen. Die thermoplastischen Formgebungsverfahren werden durch das thermisch-rheologische Verhalten der Polymerschmelzen bestimmt und setzen unterschiedliche Viskositätsbereiche der Schmelze voraus. Grundsätzlich werden im Spritzguss niedrigviskose, in der Extrusion hingegen hochviskosere Schmelzen verarbeitet.

Der in das Compound eingebrachte Holzmehlanteil steht in direktem Zusammenhang mit der Schmelzviskosität und bestimmt zu einem wesentlichen Teil die Fließeigenschaften der Schmelze. Für jedes Formgebungsverfahren ist der eingebrachte Holzmehlanteil in einem typischen Verarbeitungsbereich begrenzt. Daraus resultieren Bauteile / Halbzeuge mit rezeptur- und verarbeitungsspezifischen Eigenschaften, die in verschiedenen Anwendungsnischen zum Einsatz kommen. Tabelle 2.1 stellt den Zusammenhang zwischen Formgebungsverfahren, verarbeitbarem Holzmehlanteil und resultierenden Anwendungsbauteilen für die Werkstoffgruppe WPC dar.

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Formgebungsverfahren für WPC [Sch13, Kre08, Klu12, Cha08, Fal01, Mad09]

Formgebungs- verfahren	(Direkt)-Extrusion	Spritzguss	Formpressen
Holzanteil [Gew.-%]	50 - 70	30 - 50	50 - 80
Verarbeitungsstufen	einstufig	mehrstufig	mehrstufig
Anwendung	Terrassendecks, Konstruktionsprofile	Kleinteile, Gehäuse, Haushaltswaren, Spielsachen Hinterspritzmaterial (z. B. Stuhllehne)	Türinnenverkleidung Automobilbau
Substitution von	Vollholz (Tropenholz) Aluminiumprofile	thermoplastische Massenkunststoffe (PE, PP, PVC)	thermoplastische Massenkunststoffe (PE, PP) Duroplast (PUR)
Beispiel	 [Ite19]	 [Fib19]	 [Mit04]

2.3 Direktextrusion von WPC-Profilen

Die Direktextrusion, als einstufiges Formgebungsverfahren, ist durch das einmalige Erwärmen des Materials gekennzeichnet. Die Aufbereitung (Compoundieren) und Formgebung der hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffe finden im Gegensatz zum diskontinuierlichen Prozess in einer Wärmephase ohne Erstarren und Wiederaufschmelzen statt [Rad08]. Neben einer werkstoffschonenden Verarbeitung durch eine geringe thermische und mechanische Belastung können Kosten- und Energievorteile generiert werden. Beispielsweise wird ein Kilogramm WPC über die Direktextrusion fast 25% günstiger hergestellt als über diskontinuierliche Prozesse [Mon12]. Gegenüber dem zweistufigen Verarbeitungsprozess sind Energieeinsparungen von über 40% möglich [Bue09]. Aus diesen Gründen werden über 90% der am Markt verfügbaren WPC-Produkte über die Direktextrusion hergestellt [Rad08]. Darüberhinaus ermöglicht der hohe verarbeitbare Holzmehlanteil (üblich sind 60 - 70%) die Herstellung von Bauteilen hoher

Festigkeit und Steifigkeit, die als Konstruktionsprofile für fördertechnische Anlagen in Holzbauweise interessant sind (Bild 2.1).

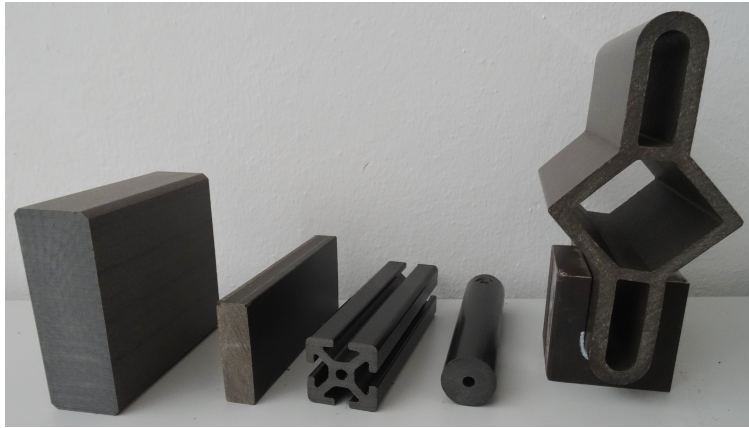


Bild 2.1: Potentielle WPC-Profile für die Fördertechnik, Konstruktionsprofil, Glattkantbrett als Gleit- leiste, Montageprofile Fa. Item, Rundprofil Fa. Item, Trag- und Gleitprofil (v.l.n.r.)

Für die Direktextrusion hochgefüllter Holz-Polymer-Werkstoffe sind komplette Direktextrusionslinien, bestehend aus eventueller Vortrocknung, getrennter Direktdosierung der Ausgangsmaterialien, Compoundierung, Entgasung, Formgebung im Werkzeug, Kalibrierung, Kühlung und Konfektionierung, etabliert [Rad07]. Das Kernsegment der Direktextrusion ist die Compoundierung zur Herstellung eines homogenen Stoffgemisches. Während der Compoundierung muss ein möglichst holzfüllstoffschonendes, aber dennoch optimales distributives und dispersives Mischen der Ausgangsmaterialien erfolgen. Die Compoundiertechnologien sind besonders an die geringe thermische Stabilität des Holzfüllstoffes angepasst. Beispielsweise sorgen spezielle Schneckenkonfigurationen mit austauschbaren Knetblöcken [Sch08] im Doppelschneckenextruder für eine geringe Friktionserwärmung und kurze lokale Verweilzeiten der Schmelze in der Schnecke [Mon12]. Innerhalb der Verarbeitungsstrecke ist die Entlüftung und Entgasung flüchtiger Bestandteile aus der Schmelze und die Temperaturkontrolle für die Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte von elementarer Bedeutung. Neben der Compoundierung mittels gegenläufigem und gleichläufigem Doppelschneckenextruder sind u. a. Planetwalzenextruder, Ringextruder, Scherwalzenextruder, Heiz-Kühl-Mischer und Pelletpresse praxisrelevante Anlagenkonfigurationen [Han13] zur Holz-Polymer-Compoundierung. In [Han13] wurden elf verschiedene Compoundierverfahren zur Verarbeitung von WPC-Rezepturen mit Holzfaserteilen von 40 - 70% untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Materialeigenschaften innerhalb der Verarbeitungsverfahren nicht vergleichbar sind und die Materialeigenschaften gleichermaßen von der Rezeptur und dem Verarbeitungsverfahren abhängen [Han13]. Dies lässt den Schluss zu, dass keine allgemeingültige Rezeptur-Prozesseigenschaftsbeziehung verfahrensübergreifend gültig ist.

Erste Qualitätsstandards und Kriterien, um die unterschiedlich hergestellten Holz-Polymer-Profile zu klassifizieren und vergleichbar zu machen sind in [NN17] von der

Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe ausgearbeitet worden. Hierbei handelt es sich um Prüfbestimmungen für Terrassendecks, die neben den Prüfmerkmalen die maximal erreichbaren Mindestwerte festlegen, damit der Werkstoff die Bezeichnung „Holzwerkstoff“ tragen darf. Relevante Prüfungen sind: Biegeprüfung, Kochwasserlagerung, Rutschfestigkeit, Biegeverhalten bei Langzeitbelastung, Verhalten bei Wechselbelastung, Verhalten bei Kugelfalltest, linear thermischer Ausdehnungskoeffizient, Verhalten bei Witterungsbelastung, Kaltwasserlagerung und Maßhaltigkeit [NN17].

Für den Einsatz der Werkstoffe in maschinenbautechnischen Anwendungen sind weitere mechanische Kennwerte für unterschiedliche Holz-Polymer-Werkstoffe vergleichend in [Sch16] aufgeführt. Zu ihnen zählen die Eigenschaftsschwankungen über die Profilbreite, die Relaxationsneigung des Werkstoffes, die Ausprägung der Anisotropie unter Scheiben- und Plattenbeanspruchung, die dichtenormierten Biegeeigenschaften und die Anwesenheit von Füllstoffagglomeraten und Lunker.

2.4 Werkstofftypische Einflussfaktoren von WPC

Als werkstofftypische Einflussfaktoren hochgefüllter Holz-Polymer-Werkstoffe sind die Anisotropie, das viskoelastische Verformungsverhalten und die hygroskopischen Eigenschaften zu nennen. Sie nehmen aus theoretischer Sicht Einfluss auf die Verbindungseigenschaften der Schraubverbindung. So ist absehbar, dass das viskoelastische Verformungsverhalten des Werkstoffes unweigerlich zum Lockern der Schraubverbindung führt, die Anisotropie des Werkstoffes richtungsabhängige Tragfähigkeiten der Schraubverbindung verursacht und die Dimensionsänderung durch Feuchtigkeitsaufnahme die Tragfähigkeit und den Vorspannkraftverlauf beeinflussen könnte. In welchem Maß die werkstofftypischen Einflussfaktoren die Verbindungseigenschaften beeinflussen, ist Gegenstand dieser Arbeit. Nachstehend werden die Einflussfaktoren auf Basis verschiedener Literaturquellen aus der Kunststoff- und Holzwerkstoffbranche näher erläutert.

Anisotropie

Holz-Polymer-Werkstoffe können aufgrund ihrer Makrostruktur als kurzfaserverstärkte Kunststoffe klassifiziert werden. Die Faserorientierung in kurzfaserverstärkten Thermoplasten führt zu einem richtungsabhängigen Werkstoffverhalten. Die größte Lastübertragung ist dann sichergestellt, wenn die Hauptbelastungsrichtung entlang des Faserverlaufes liegt. Verarbeitungsbedingt stellt sich eine abweichende Faserorientierung parallel und senkrecht zur Fließrichtung ein, die nachstehend für das Spritzguss- und Extrusionsverfahren beschrieben wird.

Während ihrer Formgebung im Spritzguss- bzw. Extrusionsverfahren bildet sich in kurzfaserverstärkten Thermoplasten durch das dort herrschende Geschwindigkeitsprofil der Schmelze die Faserorientierung aus. Daraus resultiert in alle kurzfaserverstärkten Bauteilen eine charakteristische, über die Bauteildicke geschichtete Faserorientierung.

HEGLER untersuchte diese Schichtung an Spritzgussproben und stellte sie in einem Neun-/Sieben- bzw. Drei-Schichtenmodell dar [Heg84, Heg87]. Dieses Schichtenmodell wurde sowohl bei spritzgegossenem Plattenmaterial, Hohlzylindern als auch Schulterzugstäben beobachtet, Bild 2.2. Es konnte von **AURICH** auch in naturfaserverstärkten Thermoplasten nachgewiesen werden [Aur01]. Jedoch stellte er fest, dass die faserarme Randschicht (1 in Bild 2.2) nicht so stark ausgeprägt ist [Aur01]. Das Drei-Schichtmodell (3, 5, 3) besteht gemäß Bild 2.2 aus einer Kernschicht (5), in der die Fasern quer zur Fließrichtung orientiert sind. Diese Querorientierung ist dem Dehnströmungsbereich der Schmelze zuzuordnen und resultiert aus den Quelleffekten am Anguss [Men82]. Zur Werkzeugwand grenzen die Randschichten (3) an, in denen die Fasern parallel zur Fließrichtung orientiert sind. Zwischen Werkzeugwand und Kernbereich der Schmelze besteht ein Geschwindigkeitsgradient der Scherströmung. Geht man von einer Querausrichtung der Fasern im Kernbereich aus, bewirken die auf die Fasern einwirkenden Scherkräfte eine Rotation und orientieren die Fasern in Fließrichtung um.

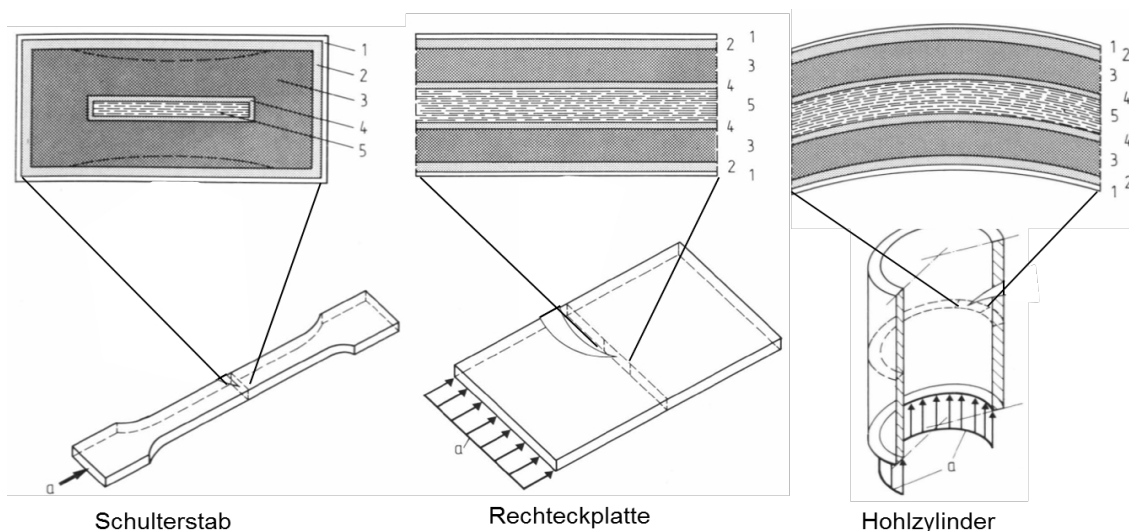


Bild 2.2: Faserorientierung in spritzgegossenen Halbzeugen nach [Heg84] 1: faserarme Randschicht, 2: regellose Faserorientierung, 3: Fasern vorwiegend parallel zur Fließrichtung, 4: regellose Faserorientierung, 5: Fasern vorwiegend senkrecht zur Fließrichtung

HEGLER definiert zwischen den Hauptschichten weitere Zwischenschichten (2, 4), in denen die Fasern eine regellose Orientierung aufweisen. Wird die beobachtete faserarme Randschicht im wandnahen Bereich der Modellauffassung hinzugezogen, resultiert das 9-Schichtenmodell. Wie sich die Schichten in ihrer Dicke, ihrer Symmetrie und Faserorientierung ausbilden, ist sowohl im Spritzguss- als auch im Extrusionsprozess von einer Vielzahl verfahrenstechnischer, konstruktiver und stofflicher Parameter abhängig [Heg87, Sim95]. So ist es beispielsweise realistisch, dass sich allein durch den Austausch des Matrixmaterials die Orientierungszustände vollständig umkehren [Heg84]. Des Weiteren hat der Faseranteil einen bedeutenden Einfluss auf die Faserwechselwirkung [Heg87]. Ab

einer bestimmten Faserkonzentration behindern sich die Fasern gegenseitig in ihrer Bewegung, sodass Abweichungen von den klassischen Orientierungszuständen zu berücksichtigen sind.

In [Sim95] wurde an extrudierten Rohren die allgemein beschriebene Schichtstruktur beobachtet. Analog zum Spritzgussprozess zeichnet sich die resultierende Faserorientierung durch die herrschenden Strömungsarten und Geschwindigkeiten ab. Die sowohl in der Extruderdüse als auch beim Verlassen der Düse herrschenden Scherströmungen beeinflussen die Bewegung der Fasern auf einer Strömungslinie und tragen verallgemeinert zur Umorientierung der Fasern bei. Die dreidimensionale Faserorientierung beim Verlassen der Düse wird maßgeblich von der Anfangsorientierung der Fasern, deren Abmessung und der Düsengeometrie bestimmt. Die experimentellen Untersuchungen in [Sim95] zeigten, dass die Fasern im zentralen Bereich des Strömungskanals regellos bzw. wenig orientiert und im Wandbereich fast ausschließlich parallel zur Fließrichtung orientiert sind. Bild 2.3 stellt zusammenfassend die resultierende Faserorientierung von kurzfaserverstärkten Spritzguss- und Extrusionshalbzeugen schematisch gegenüber.

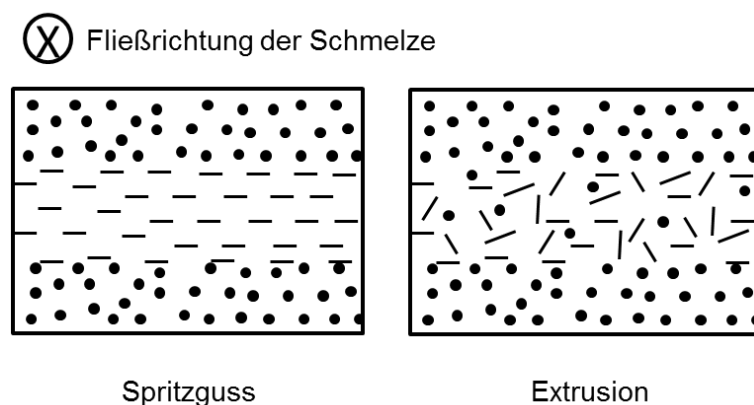


Bild 2.3: Schematische Faserorientierung nach Beschreibungen aus [Sim95, Heg84]

Für hochgefüllte, extrudierte Holz-Polymer-Werkstoffe wird auf Basis der beschriebenen Grundlagen die geschichtete Faserorientierung gemäß Bild 2.3 erwartet. Die mikroskopischen Untersuchungen in [Kor14] zeigten eine deutliche Ausrichtung der holzbasierenden Füllstoffe in extrudierten Proben und untermauern damit die Erwartung. Jedoch ist zu erwähnen, dass in dieser Veröffentlichung die Vorzugsorientierung der holzbasierenden Füllstoffe nicht mit der Fließrichtung der Schmelze in Zusammenhang gesetzt worden ist.

Hygroskopische Eigenschaften

Holz-Polymer-Werkstoffe besitzen aufgrund ihrer hydrophilen Holzkomponente im Compound hygroskopische Eigenschaften. Der Werkstoff ist als ein Gemisch aus hydrophoben Polyolefinen und hydrophilen holzbasierenden Füllstoffen zu verstehen. Die vorwiegend eingesetzten Polyolefine sind unpolar und nehmen dadurch selbst kein Wasser auf, besitzen aber gegenüber Wasser eine gewisse Durchlässigkeit. Dies wird durch den Wasserdampfpermeabilitätskoeffizienten beschrieben. Da zusätzlich in dem Gefüge kleine Poren vorhanden sind, wie beispielsweise im Bereich der Faser-Matrix-Grenzfläche, kann Wasser in das Compound eindringen [Rad07]. Ist das Compound verarbeitungsbedingt noch von einer Randschicht umgeben, ist die Wasseraufnahme ausgehend von der Außenfläche des Compounds vermindert [Bur11, Che10].

Die Wasserabsorption in den Verbund wird mit Hilfe des Diffusionsmechanismus beschrieben, dessen Absorptionsgeschwindigkeit proportional zum eingebrachten Holzfasergehalt ist [Rad06, Bur11, Che10]. Die Wasserabsorption erfolgt dabei in die Zellwand der Holzfasern und an der Faser-Matrix-Grenzfläche durch molekulare Anziehungskräfte [Taj03]. Der Feuchtetransport findet innerhalb der Holzfasern bis zum Fasersättigungsbereich (Holzfeuchteanteil bei 28%) ebenfalls über Diffusion statt [Nie93]. In der Regel ist in einem Compound nahezu jedes Partikel von Matrixmaterial umgeben, sodass die Weiterleitung des Wassers von Partikel zu Partikel stetig unterbrochen wird. Damit ist der Wassertransportmechanismus im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen deutlich gehemmt [Bur11]. Dementsprechend lange dauert es, bis das Compound in Abhängigkeit des Holzfasergehalts seine Ausgleichsfeuchte erreicht hat. Beispielsweise erreicht ein Verbund mit 70 Gew.-% Holzmehl nach ca. 7 Wochen seinen Sättigungszustand, ein Verbund mit 30 Gew.-% hingegen erst nach 3,5 Jahren [Bur11].

Untersuchungen zur lokalen Feuchtigkeitsaufnahme über die Bauteildicke in [Bur11, Che10] zeigten, dass die Feuchtigkeitsaufnahme am Randbereich am größten ist und zur Bauteilmitte hin abnimmt. Ein mit 60% Holzmehl verstärktes Polypropylen besaß nach 30-tägiger Wasserlagerung im Randbereich einen Feuchtegehalt von 5%, in 2,5 mm Schnitttiefe hingegen nur noch 3%. *DEFOIRDT* untersuchte an handelsüblichen Holz-Polymer-Profilen sowohl die Wasseraufnahme als auch -abgabe in einem Klimastufenversuch und verglich sie mit üblichen Holzwerkstoffen. In diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass WPCs das Wasser deutlich schneller aufnehmen als sie bei sinkender Luftfeuchtigkeit abgeben [Def10]. Das bedeutet, dass der Werkstoff das im Compound gebundene Wasser noch lange nach der Feuchtigkeitsauslagerung speichert.

Werkstoffbedingte Faktoren, die die Wasseraufnahme beeinflussen sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen beschrieben. Die relevantesten Einflussgrößen sind der Holzanteil, die Holzart, die Partikelgröße, die Polymermatrix, Additive, das Verarbeitungsverfahren und die Faser-Matrixhaftung [Bur11, Taj03, Ben13, Spe07, Rad06]. Unabhängig von den benannten Einflussparametern ist in [Ben12] die Wasseraufnahme in Korrelation

mit der Werkstoffdichte gesetzt worden. Analog zu Holzwerkstoffen stellte man fest, dass mit steigender Materialdichte / Rohdichte die Feuchtigkeitsaufnahme steigt [Ben12].

Bedingt durch die Feuchtigkeitsaufnahme treten in dem holzbasierenden Füllstoff bis zum Fasersättigungsbereich Quellerscheinungen auf [Nie93]. Das Quellmaß des Holzes ist richtungsabhängig und beträgt für Fichte in Längsrichtung 0,2...0,3% in radialer Richtung 3,7% und in tangentialer Richtung 8,5% [Nie93]. Diese richtungsabhängige Faserquellung führt womöglich zum anisotropen Quellverhalten der Holz-Polymer-Werkstoffe. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick der ermittelten Quellmaße in Längs- und Breitenrichtung sowie in der Dickenrichtung. Die nach dem WPC-Gütesiegel beschriebenen Grenzwerte nach 28-tägiger Kaltwasserlagerung sind als Normwert mit aufgeführt.

Die Feuchtigkeitsaufnahme hat direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Materials. Grundsätzlich nimmt mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt die Materialsteifigkeit und Festigkeit ab, wo hingegen die Dehnung zunimmt [Hua06, Rad07]. Als Richtwert gibt HUANG für eine Feuchtigkeitsaufnahme von 3% eine Reduzierung der mechanischen Kennwerte um 15% an [Hua06].

Tabelle 2.2: Wasseraufnahme und Quellung von WPC und Holzwerkstoffen im Vergleich (WPC-Profil mit 70 Gew-% Holz nach 28-tägiger Kaltwasserlagerung), Angaben in %

	WPC [Ben12]	WPC [Sch10]	Grenzwerte Gütesiegel [NN17]	MDF [Nie93] [Hua06] [Swi19]	PB [Nie93] [Hua06] [Egg14]	OSB [Nie93] [Hua06]	PLY [Nie93] [Hua06]
Wasseraufnahme	26,6	5,2..8,6	7	8**	8**	10**	14**
Längenquellung		0,45	0,4	0,2..0,3*	0,4*	0,08*	0,12*
Dickenquellung	8,5	4,5	4,5	8 – 15 (nach 24 h)	12 – 17 (nach 24h)	15 (nach 24h)	k.A.
Breitenquellung		1	1	-	-	-	-
Kantenquellung	9,3	k.A.	k. A.	-	-	-	k.A.

*in Verarbeitungsrichtung, **keine Sättigung

Viskoelastisches Verformungsverhalten

Hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe besitzen aufgrund ihrer Hauptbestandteile Holz und Polyolefine viskoelastische Materialeigenschaften. Holz ist dabei wegen seiner Komponenten Cellulose, Hemicellulose und Lignin als hochpolymerer Werkstoff zu verstehen [Aon14]. Für die Anwendung bedeuten viskoelastische Materialeigenschaften, dass des Werkstoffes mechanische Eigenschaften temperatur-, zeit-, belastungs- und geschwindigkeitsabhängig sind. Bild 2.4 stellt das Vier-Parameter-Modell zur Beschreibung des viskoelastischen Verformungsverhaltens von Kunststoffen dar.

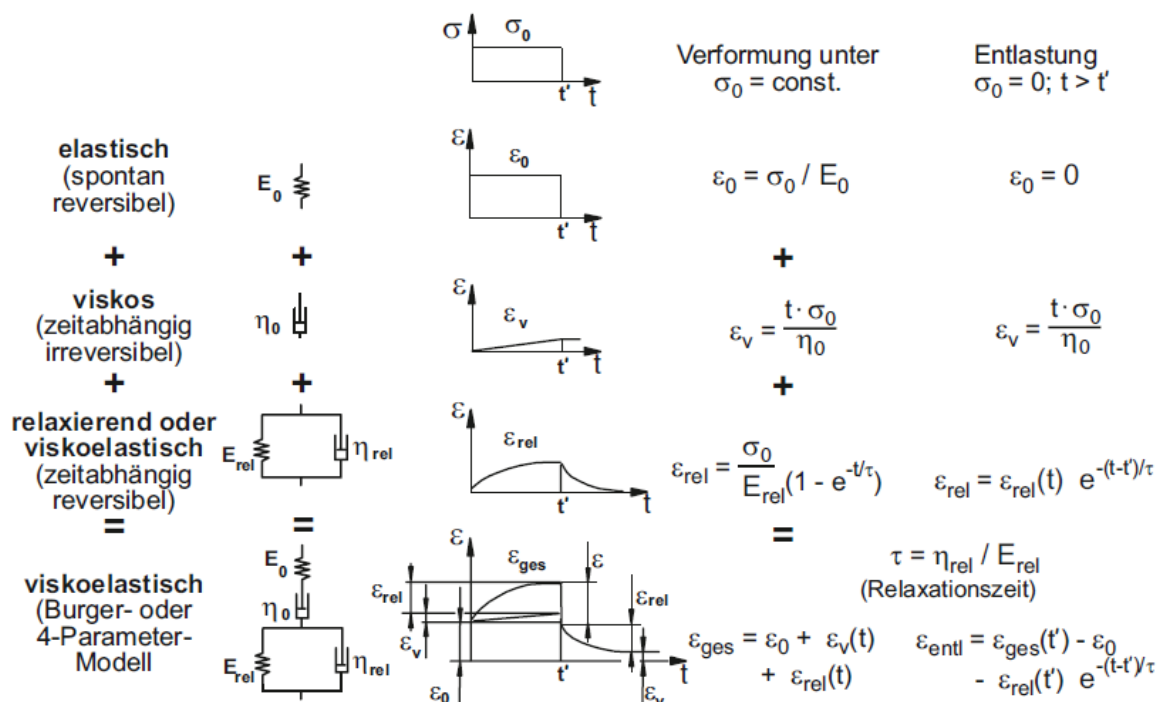


Bild 2.4: Vier-Parameter-Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen [Ehr11] ($0 =$ elastisch; $v =$ viskos, $rel =$ relaxierend, $entl =$ Entlastung, $t = t_s$)

Um das viskoelastische Materialverhalten zu beschreiben, haben sich sowohl für Holz als auch für Kunststoffe Materialmodelle etabliert, die eine Zusammenschaltung von Federn und Dämpfern darstellen. Mit diesen mechanischen Komponenten werden die Verformungsanteile des viskoelastischen Werkstoffes elastisch (spontan, reversibel), viskoelastisch (zeitabhängig, reversibel) und viskos (zeitabhängig, irreversibel) abgebildet [Ehr11]. Die elastische Verformung basiert auf einer spontanen Abstandsänderung der Atome und Valenzwinkelverzerrungen in den chemischen Bindungen [Ehr11]. Diese Verformung nimmt proportional mit der Krafteinwirkung zu und wird daher mit der Funktionsweise einer mechanischen Feder gleichgesetzt. Der Proportionalitätsfaktor ist der E-Modul bzw. die Federsteifigkeit. Das elastische Verhalten ist reversibel, da bei vollständiger Entlastung die Verformung Null ist. Der viskose Verformungsanteil wird durch die Viskosität des Stoffes, der einwirkenden Spannung und der Zeit beschrieben.

Daher ist dieser Verformungsanteil mit der Wirkungsweise eines mechanischen Dämpfers gleichzusetzen. Bei konstanter Lasteinwirkung nimmt die Verformung mit der Zeit zu. Nach der Entlastung bleibt die Verformung bestehen. Sie ist irreversibel. Das viskoelastische Verformungsverhalten basiert auf Moleküumlagerungsvorgängen [Ehr11]. Das bedeutet, dass bei einer viskoelastischen Verformung die Moleküle und/oder Molekülketten verzögert auf die einwirkende Spannung mit einer Verformung reagieren bis die Gleichgewichtslage erreicht ist [Ehr11]. Diese Zeitverzögerung wird durch die Relaxationszeit τ beschrieben. Dieser Verformungsanteil wird in der Modellvorstellung durch die Parallelschaltung einer Feder mit einem Dämpfer dargestellt. Die Viskoelastizität ist eine reversible Verformung, d. h. bei Entlastung stellt sich eine zeitverzögerte Rückverformung ein. Da sich bei Kunststoffen die drei beschriebenen Verformungsanteile überlagern, hat sich das Vier-Parameter-Modell (Burger-Modell) als annähernd gute Beschreibung des linearviskoelastischen Materialverhaltens erwiesen [Ehr11]. Es ist gekennzeichnet durch die Aneinanderreihung der elastischen, viskosen und viskoelastischen Komponente. Für die Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens von Holz existieren eine größere Anzahl an Modellvorstellungen. In [Aon14] sind die aus der Literatur bekannten 12 rheologischen Modelle für Holz zusammengefasst. Das Vier-Parameter-Modell wird unter anderem von KOLLMANN zur Beschreibung herangezogen [Kol61].

Erfährt ein viskoelastischer Werkstoff eine konstante Deformation, baut sich umgehend eine Spannung auf, die über die Zeit durch Moleküumlagerungsprozesse abklingt/relaxiert (Spannungsrelaxation). Bei der Dehnungsrelaxation führt eine aufgebrachte konstante Spannung zu einer zeitlich fortschreitenden Dehnung. Die Dehnungsrelaxation wird als Kriechen bzw. Retardation bezeichnet [Ehr11].

Partikelgefüllte und faserverstärkte Polymercompounds besitzen im Vergleich zu unverstärkten Kunststoffen ein weniger ausgeprägtes Relaxationsverhalten. Die in [Oba17] zusammengefasste Literaturlauswertung zum Relaxationsverhalten von faserverstärkten Polymeren belegt, dass die Zugabe verschiedener Fasern in Polymercompounds den Relaxationsprozess entschleunigt. Das bedeutet, dass unabhängig von dem im Compound eingebrachten Faserstoff die Relaxationsgeschwindigkeit mit zunehmendem Faseranteil sinkt. Dies wurde für die Materialkombinationen Kevlarfasern in Polyurethan, [Kut91], Polyesterfasern in Polyurethan [Suh98], holzbasierenden Füllstoffen in PP [Bha06, Wan11], Bananenfaser in Polyestercompositen [Pot04], Glasfasern in HDPE [Sae14] und Palmenfasern in PP [Bou15] nachgewiesen. Als Erklärung des Effektes wird in [Oba17] formuliert, dass die Fasern die Moleküumlagerungsvorgänge im Bereich der Faser-Matrix-Grenzschicht unterbinden. Die Relaxationsdifferenz zwischen einem unverstärkten Polymer und einem mit 50 Gew.-% faserverstärktem Polymer liegt bei etwa 10% [Oba17]. Neben dem Faseranteil hat das Aspektverhältnis zwischen Länge und Dicke der eingesetzten Faser ebenfalls einen großen Einfluss. So verringern Fasern mit einem großen Aspektverhältnis die Relaxationsneigung deutlich stärker als partikelförmige Stoffe [Oba17]. Desweiteren zeigten Untersuchungen zu unterschiedlichen Haftvermittleranteilen

und Typen im Compound eine Verringerung der Relaxationsneigung [Ble04, Wan11, Bha06].

Beim Verspannen einer Schraubverbindung in viskoelastischen Werkstoffen treten gemäß Definition beider Begriffe sowohl Relaxations- als auch Retardationseffekte auf, die zum zeitlichen Verlust der Vorspannkraft führen. Eine eindeutige Trennung beider Effekte ist in der Schraubverbindung nicht möglich. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Verlust der Vorspannkraft infolge Lockerns durch Kriechen und Relaxation mit dem Begriff Vorspannkraftrelaxation/ (Vorspannkraftabfall) verallgemeinert. Der Relaxationsverlauf ist gekennzeichnet durch eine sich ändernde Relaxationsgeschwindigkeit. Die Relaxationsgeschwindigkeit ist innerhalb der ersten Stunde am größten und nimmt mit zunehmender Zeit ab [Tom00]. Darüberhinaus hat die Deformationshöhe Einfluss auf die Relaxationszeit, d. h. eine größere Verformung zieht eine Verkürzung der Relaxationszeit nach sich [Kri72]. Die belastungsabhängige Relaxationsneigung wurde sowohl in einachsigen Zug-Druck-Versuchen für Kunststoffe [Kri72] und Holz [Huc18, Ech69] als auch in Kunststoffdirektverschraubungen nachgewiesen [Ona89, Dra99, Tom00, Kri72]. Demnach müsste eine stärker vorgespannte Schraubverbindung deutlich stärker relaxieren als eine weniger vorgespannte Schraubverbindung, sodass eine hoch vorgespannte Schraubverbindung unnötig erscheint.

2.5 WPC-Extrusionsprofile in technischen Anwendungen

Das Substitutionspotential hochgefüllter WPC-Extrusionsprofile für technische Anwendungen ist durch ihren technischen Mehrwert aus der Eigenschaftskombination aus:

- 3D-Urformbarkeit → hohe Designfreiheit
- vielfältige Bearbeitungsmöglichkeiten, gute Spanbarkeit aller Richtungen [NN04]
- gute tribologische Eigenschaften [Eic09, Eic12]
- ökonomische und ökologische Vorteile [Sch97, Sch95, Kro02]
- hohe Härte und Druckfestigkeit im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen [Sch16]
- hohe spezifische Steifigkeit [Wit94, Ort05]
- gutes akustisches Dämpfungsvermögen [Sch03]
- geringer Wärmeausdehnungskoeffizient [Rad08, Sch13]
- keine elektrische Leitfähigkeit (wg. kompletter Metallfreiheit) [Spe07]

gegenüber Aluminium, Kunststoffen und anderen Holzwerkstoffen begründet. Damit erweitern hochgefüllte WPC-Extrusionsprofile das Werkstoff- und Halbzeugsortiment für Holzwerkstoffkonstruktionen im Maschinenbau. Der Fokus für den Materialeinsatz ist weniger im Leichtbau zu sehen, sondern vielmehr in tribologisch beanspruchten Bereichen.

Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten des Werkstoffes WPC zeigten sowohl an Spritzgussmaterial als auch an hochgefüllten Extrusionsprofilen ein tribologisch vorteilhaftes Verhalten von Gleitschienen in relevanten Reibpaarungen der Fördertechnik auf [Eic09, Eic12]. Im Vergleich zu den klassischen Reibpaarungen PE UHMW gegen Stahl und PE UHMW gegen Kunststoff zeigte der Austausch des klassischen Gleitleistenwerkstoffes PE UHMW mit WPC geringere Reibwerte und einen geringeren Verschleiß [Eic09]. In der Anwendung als Gleitschiene ist WPC dem derzeit eingesetzten Werkstoff PE UHMW tribologisch und preislich überlegen. Die vertretbaren mechanischen Eigenschaften (Materialsteifigkeit und Festigkeit auf Biegung) von hochgefüllten WPC-Extrusionsprofilen bei gleichzeitig tribologisch vorteilhaften Eigenschaften führten erstmals zu einer Funktionsintegration in einem Bauteil. Im Ergebnis der Entwicklung entstand aus einem Aluminium-WPC-Hybridprofil ein funktionsintegriertes Trag- und Gleitelement als Prototyp für Hängefördersysteme im Biegebelastbereich bis 100 kg/m [Eic13] (Bild 2.5 f).

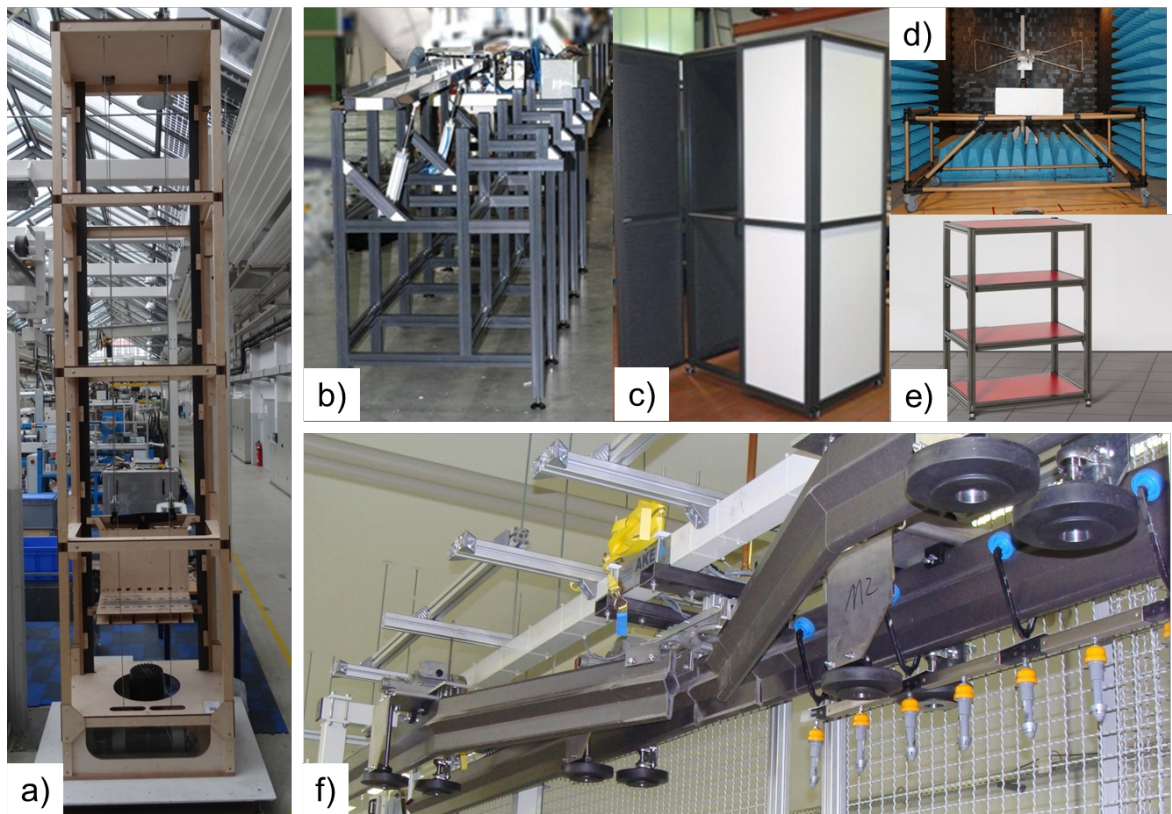


Bild 2.5: Anwendungsbeispiele hochgefüllter WPC-Profile a) Gleitleiste im Vertikalförderer [Klu17], b) Abwurftisch Hiendl NFC Profile [Hie10], c) Schallschutzgerüst [Hie19], d) EMV-Messtand [Hie19], e) Regalsystem [Ite19], f) Hängefördersystem mit Trag- und Gleitelement [Eic13]

In einem weiteren Prototyp wurde dieser technisch-ökonomische Mehrwert in Form von WPC-Gleitleisten eines Vertikalförderers in Holzbauweise umgesetzt [Klu17] (Bild 2.5 a). Hierbei handelt es sich um eine Substitutionsvariante der konventionellen Metallbauweisen.

In der Anwendung als Montageprofil z.B. von der Firma Item (Bild 2.1) sind die WPC-Extrusionsprofile eine preislich günstigere Alternative zu Aluminiumprofilen im unteren Lastbereich. Sie ähneln den Aluminiumprofilen im Querschnitt sehr stark. Die Kosten eines WPC-Montageprofils im Vergleich zu einem Aluminium-Montageprofil gleicher Baugröße unterscheiden sich um etwa den Faktor 2 (9,67 €/lfm WPC- Profil, 19,47 €/lfm Al-Profil, Einkaufspreis 2016). In den Einsatzbereichen von Regalsystemen, Beistellwagen und Rahmen für Maschinenschutzgitter bei Automations- und Robotertechnik, Verarbeitungsmaschinen oder Förderanlagen könnten die WPC-Montageprofile dabei ihr Potential ausschöpfen (Bild 2.5 b,c, e). Eine weitere Anwendung von WPC-Montageprofilen in Kombination mit einer nichtmetallischen Verbindungstechnik sind Gestellsysteme für EMV-Messungen, welche von der Firma Hiendl bereitgestellt werden [Hie10] (Bild 2.5 d). Zur Bestätigung des technisch-ökonomischen Potentials im unteren bis mittleren Lastbereich wurde ein vergleichender Dreipunktbiegeversuch an Aluminiumprofilen, WPC-Montageprofilen und an dem bereits in der GreenLogisticPlant eingesetzten WVC-Leichtbauprofil durchgeführt. Dieser Profilvergleich in Bild 2.6 untermauert die technische Relevanz der WPC-Montageprofile besonders unter Berücksichtigung des Materialpreises.

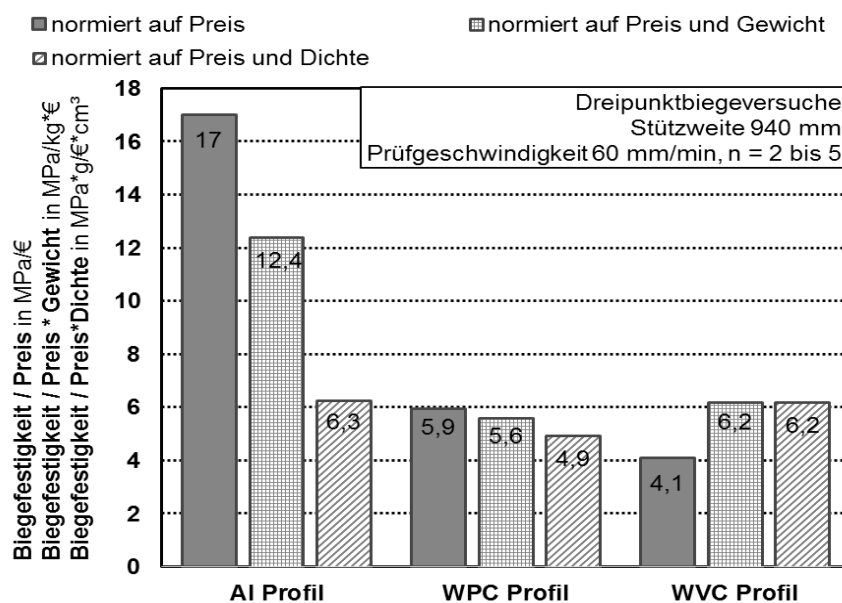


Bild 2.6: Preis-Leistungs-Vergleich der Profile aus WPC (Fa. Item), Aluminium (Fa. Item) und WVC, Grunddaten für den Profilvergleich siehe Anhang Tabelle A 1

Über die bestehenden Anwendungen in der Fördertechnik hinausgehende Beispiele von WPC-Extrusionsprofilen in tragenden Anwendungen sind Konstruktionsbohlen für statische Baugruppen im Außenbereich [Nov16]. Eingesetzt werden diese beispielsweise als Stegsegmente, Sichtschutzsäulen und substituieren infolge ihrer Witterungsstabilität Konstruktionshölzer.

2.6 Lösbare Verbindungstechnik von WPC-Extrusionsprofilen

Dieses Kapitel verschafft einen Überblick zu bisherigen lösbaren Verbindungstechniken für WPC-Extrusionsprofile und den dabei bestehenden Problemen, die für den bisherigen Einsatz in der GreenLogistikPlant hinderlich sind. Es stehen die lösbaren Verbindungstechniken der technischen Profile aus WPC im Vordergrund und weniger derer aus dem Terrassendeckbereich.

Für eine sichere und einfache Handhabung der lösbaren Verbindungstechnik im industriellen Umfeld müssen die Verbindungsmittel



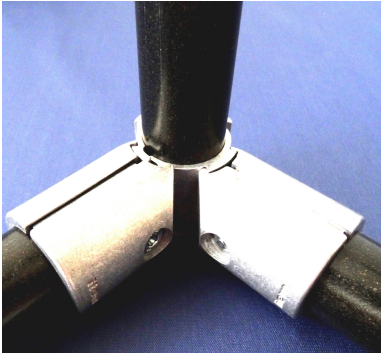
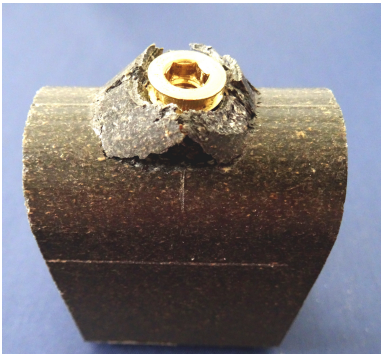
- universell einsetzbar sein
- den Montageaufwand gering halten
- ggf. die Mehrfachmontage gewährleisten
- auf den zu verbindenden Werkstoff angepasst sein
- die Nachstellbarkeit der Verbindung gewährleisten
- den Kosten- und Gewichsfaktor durch eine geringe Anzahl an handelsüblichen Verbindungsmitteln berücksichtigen.

Besonders für die lösbare Verbindungstechnik von Holzwerkstoffen ist die Nachstellbarkeit von elementarer Bedeutung, um der bestehenden Vorspannkraftrelaxation in der Schraubverbindung über die Betriebsdauer entgegenzuwirken. So ist es im Ingenieurholzbau üblich, die Schraubverbindungen in regelmäßigen Abständen nachzuziehen, um die relaxierte Vorspannkraft wieder auf das Anfangsniveau einzustellen [Moe70].

Das Hauptproblem aktueller lösbarer Verbindungstechnik von hochgefüllten WPC-Extrusionsprofilen ist, dass diese nicht an die werkstoffspezifischen Eigenheiten (Anisotropie, Viskoelastizität, Dimensionsinstabilität durch Klimaeinwirkung) angepasst sind. Dies spiegelt sich im geringen konstruktiven Formschlussanteil und der teilweise fehlenden Nachstellbarkeit in den Verbindungsstellen wider. Die teilweise hohe Verbindungsmittelanzahl, die die Baugruppe unnötig erschweren, überteuern und den Montageaufwand erhöhen, stellt einen weiteren Nachteil dar.

Tabelle 2.3 stellt die derzeitigen Verbindungstechniken von WPC-Extrusionsprofilen sowie dessen Probleme in der Anwendung gegenüber. Darin wird deutlich, dass die bisherigen lösbaren Verbindungstechniken für die Halbzeuge entweder zu viele Verbindungsmittel erfordern, die einen hohen Montageaufwand verlangen, oder einen für diesen Werkstoff nicht beherrschbaren Einschraubprozess erfordern. Um eine wirtschaftlich rentable Lösung anzustreben, sind die Einschraubverbindungen ohne Zusatzelement vorteilhaft, müssen aber hinsichtlich ihrer technischen Grenzen und der Prozesssicherheit im Fügeprozess weiterentwickelt werden. Es muss klar definierbar sein, wie beispielsweise eine Schraube in das Material einzuschrauben ist und mit welchem Anzugmoment die Verbindung montiert werden kann.

Tabelle 2.3: Verbindungstechnik ausgewählter technischer Profile

Technische Profile	Aktuelle Verbindungstechnik	Nachteile, offene Punkte
Gestellsystem Vierkantprofil Firma item [Ite19]	 <p>Nutenscheibe mit gewindeformender Schraube</p>	<ul style="list-style-type: none"> • fehlender Formschluss im Klemmkontakt • ungeklärte Nachstellbarkeit durch Nachziehen • keine Vorgaben zu Montageparameter • keine Prozesssicherheit im Fügeprozess
Gestellsystem Vierkantprofil Firma item [Ite19]	 <p>Mutter für T-Nuten mit Montage- winkel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Anzahl der VBM • hoher Montageaufwand • produktspezifische Verbindungsmittel • fehlender Formschluss im Klemmkontakt • ungeklärte Nachstellbarkeit durch Nachziehen
Gestellsystem Rundprofil item [Ite19]	 <p>Welle-Nabe Pressverbund</p>	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Anzahl der VBM • hohes Gewicht • produktspezifische VBM • sehr hoher Montageaufwand • begrenzte/keine Nachstellbarkeit
Trag- und Gleit- profil [Nov13]	 <p>Schraubinsert (versagt)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Belastbarkeit im Anwendungsfall • Schadensfall der Verbindung führt zum Totalausfall des Systems • keine Vorgaben zu Montageparameter • keine Prozesssicherheit im Fügeprozess

2.7 Einschraubverbindung der Holz-, Kunststofftechnik und des Maschinenbaus

2.7.1 Einführung

Die Definition einer Einschraubverbindung ist weder eindeutig noch werkstoffübergreifend. Im klassischen Maschinenbau sind Einschraubverbindung [VDI2230] als auch Aufschraubverbindung [VDI2251] und Sacklochverschraubung [Wie07] geläufige Begriffe für das Eindrehen der Schraube in die dafür vorgesehene Gewindebohrung. Im Holz- und Möbelbau sind Verbindungen mit gewindeformenden/schneidenden Spezialschrauben als Holzschraubverbindung definiert [DIN1995].

Das Eindrehen von „gewindeformenden Metallschrauben mit speziellen Flanken-geometrien in vorgeformte, zylindrische Aufnahmelöcher“ oder Sacklochbohrungen im Anbauteil [Ehr04] ist für Kunststoffe und Leichtmetalle [Wue16] als Direktverschraubung definiert. Das Direktverschrauben von Leichtmetallwerkstoffen wie Magnesium-, Zink- und Aluminiumlegierungen ist mit vergüteten Verbindungselementen (FK 10.9) möglich [Fri05]. Gewindefurchende Schrauben für Metalle sind furchende Schrauben mit metrischem Gewinde und Blechschrauben mit Gewinde nach DIN EN ISO 1478 [Wue16]. Bei Direktverschraubungen formt die Spezialschraube ihr Muttergewinde im Bauteilwerkstoff beim Eindrehen selbst aus. Es entfällt im Vergleich zu klassischen Einschraubverbindungen des Maschinenbaus der Bearbeitungsaufwand durch das Gewindeschneiden. Eine Einteilung der branchentypischen Einschraubverbindungen stellt Bild 2.7 dar.

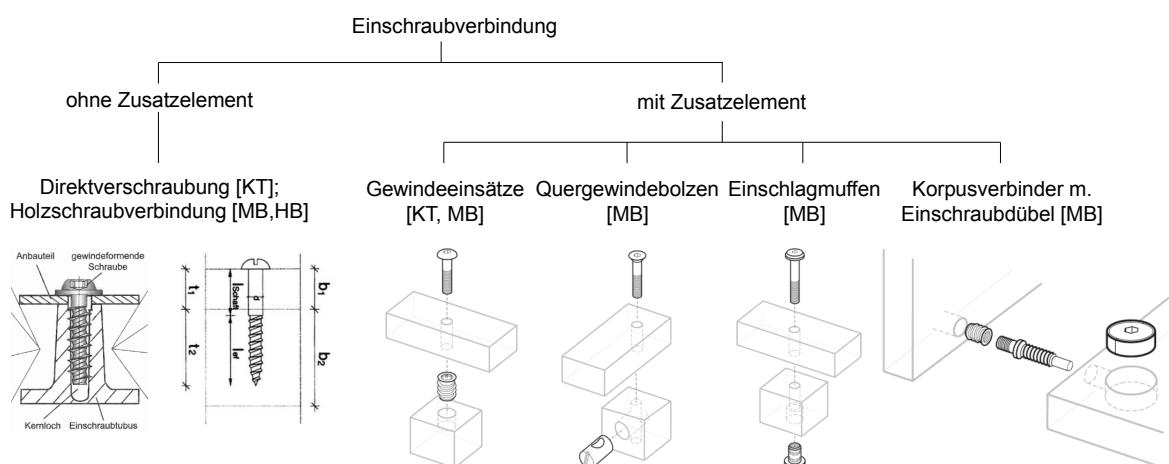


Bild 2.7: Einteilung der Einschraubverbindungen nach Zusatzelement und Branche, HB = Holzbau, MB = Möbelbau, KT = Kunststofftechnik [DIN1995, Ram16, Ehr04]

Die Direktverschraubung ist ein eigenständiges, lösbares Fügeverfahren und eine Sonderform der Einschraubverbindung. Demgegenüber stehen Schraubverbindungen mit metallischem Zusatzelement. In der Kunststofftechnik sind das Gewindeeinsätze mit genormtem Anschlussgewinde die entweder während der Bauteilherstellung oder

nachträglich eingedreht/ eingebettet werden [Ehr04]. Im Möbelbau sind neben Gewindeeinsätzen nach DIN 7965, Quergewindebolzen, Rundmuttern, Einschlagmuffen Korpusverbinder und die Kombination aus Schraube und Holzdübel verbreitet [Ram16]. Einschraubverbindungen umfassen in dieser Arbeit lösbare Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln, die über das Fügeverfahren Schrauben direkt in das Bauteil oder in das im Bauteil enthaltene Zusatzelement eingedreht und nicht von der Gegenseite gekontert werden. Es wird unterschieden in Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben (= Direktverschraubung) und Einschraubverbindungen mit Zusatzelement. Im Fokus steht hierbei der Quergewindebolzen mit metrischem Anschlussgewinde als Zusatzelement, da damit eine einfache Montage von symmetrischen Hohl- und Strukturprofilen beispielsweise das Trag- und Gleitprofil [Sch17] bei gleichzeitig hoher Belastbarkeit im Vergleich zu anderen Zusatzelementen möglich ist.

2.7.2 Einschraubverbindung des klassischen Maschinenbaus

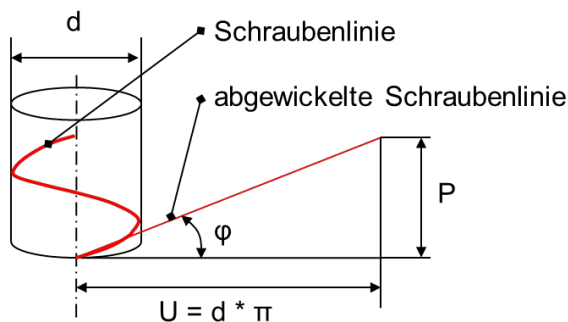
Funktionsprinzip und Anwendung, Einteilung

Die Schraube ist das häufigste und in unterschiedlichsten Ausführungen eingesetzte Verbindungselement im Maschinen- und Anlagenbau. Die Schraubverbindung besteht aus einer Schraube mit Außengewinde und einem Bauteil bzw. Mutter mit Innengewinde. Beim Eindrehen der Schraube gleiten die Gewindeflanken der Schraube auf den Gewindeflanken des Muttergewindes ab. In Abhängigkeit von der Gewindesteigung führt die Schraube beim Drehvorgang eine Längsbewegung aus. Es entsteht im Gewinde zwischen Schraube und Mutter/Bauteil zunächst ein Formschluss. Beim Festziehen des Gewindes werden die Gewindegänge aufeinander verspannt, sodass ein Kraftschluss vorliegt. Dies erfolgt, indem die Schraube eine elastische Dehnung und das Bauteil eine elastische Stauchung erfährt. Im Maschinenbau unterscheidet man in Befestigungsschraub-, Bewegungsschraub- und Dichtungsschraubverbindung [Muh05]. Befestigungsschraubverbindungen können dabei vorgespannt und nicht vorgespannte Verbindungen sein. Letztgenannte sind im Maschinenbau von untergeordneter Bedeutung. Vorspannte Schraubverbindungen werden vor dem eigentlichen Angreifen der Betriebskraft durch die beim Anziehen der Schraube aufgebrachten Vorspannkraft F_v bereits belastet [Muh05]. In dieser Arbeit stehen ausnahmslos vorgespannte Befestigungsschraubverbindungen im Fokus.

Gewinde und Festigkeitsklasse von Schrauben

Das Gewinde ist eine um einen Zylinder gewickelte Schraubenlinie, dessen Abwicklung zu einer schiefen Ebene mit der Steigung P , dem Steigungswinkel φ und des Kreisumfanges $\pi \cdot d$ führt (Bild 2.8). Der Steigungswinkel φ ist aus dem geometrischen Zusammenhang nach Formel 1 zu berechnen. Die für vorgespannte Schraubverbindungen relevante Gewindeart ist das metrische ISO-Regelgewinde. Dessen Gewindegeometrie mit einem Flankenwinkel α_F von 60° in der Norm DIN 13-1 festgelegt ist. Schrauben und Muttern

werden zur Beurteilung ihrer Festigkeit in Festigkeitsklassen unterteilt. Die Festigkeitsklasse wird auf dem Verbindungsmittel durch zwei Zahlen angegeben. Dabei entspricht die erste Zahl dem 1/100 der Zugfestigkeit R_m in N/mm^2 und die zweite Zahl das zehnfache Produkt aus beiden Zahlen der Streckgrenze. Für eine Schraube der Festigkeitsklasse 10.9 entspricht dies einer Zugfestigkeit von $10 \cdot 100 = 1000 N/mm^2$ und der Streckgrenze R_e von $10 \cdot 9 \cdot 10 = 900 N/mm^2$.



$$\tan(\phi) = \frac{P}{d \cdot \pi} \quad [\text{Muh05}] \quad (1)$$

Bild 2.8: Schraubenlinie nach [Muh05]

Beanspruchung der Schraubverbindung

Befestigungsschraubverbindungen des Maschinenbaus haben die Funktion Betriebskräfte von Bauteil A auf Bauteil B zu übertragen. Dabei treten stets statisch und dynamisch überlagerte Betriebskräfte auf, die sowohl als Druck- und Zugkraft parallel zur Schraubachse (Hauptschluss) als auch als Querkraft senkrecht zur Schraubachse (Nebenschluss) vorliegen. Aus diesem Grund sind Schraubverbindungen sowohl im Haupt- als auch im Nebenschluss vorgespannte Verbindungen, deren Funktionsfähigkeit nur erfüllt ist, wenn die Klemmkraft in der Verbindung von den wirkenden Betriebskräften nicht überschritten wird. Zur Auslegung vorgespannter Befestigungsschraubverbindungen ist die Höhe der Vorspannkraft die bestimmende Größe.

Berechnung der Schraubverbindung und Verspannungsschaubild

Die Berechnung der klassischen Einschraubverbindung des Maschinenbaus erfolgt nach der VDI-Richtlinie 2230, der systematischen Berechnung hoch beanspruchter Schraubverbindungen. Diese Berechnung setzt das linearelastische Kraft-Verformungsverhalten der Schraube und der zu verspannenden Bauteile voraus. Hierfür wird sowohl das Verspannungsschaubild für den Montage- als auch für den Betriebszustand herangezogen. Berechnungsgrundlage des Kraft-Verformungsverhaltens in der Schraubverbindung ist das Hookesche Gesetz. Daraus lässt sich mit Hilfe der auf die Ausgangslänge l bezogenen Längenänderung f_L und der auf die Querschnittsfläche A bezogene Kraft F die Nachgiebigkeit δ wie folgt berechnen [Wie07]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \rightarrow \frac{f_L}{l} = \frac{F}{A \cdot E} \rightarrow \frac{f_L}{F} = \frac{l}{E \cdot A} = \delta \quad [\text{Wie07}] \quad (2)$$

Auf Basis dieser Grundlage und der Festlegung auf eine zentrisch verschraubte Verbindung wird das Verspannungsschaubild in Bild 2.9 und Bild 2.10 nach [Wie07] erklärt. Beim Festziehen der Schraube auf die Montagevorspannkraft F_v erfährt die Schraube eine elastische Längung um f_{SV} und die zu verspannenden Bauteile eine elastische Stauchung um f_{PV} . Der Vorspannkraftbetrag ist in Schraube und Bauteil gleich. Trägt man diese Kraft-Verformungskennlinien von Schraube und Bauteil vorzeichenunabhängig auf, erreicht man das Verspannungsdreieck für den Montagezustand.

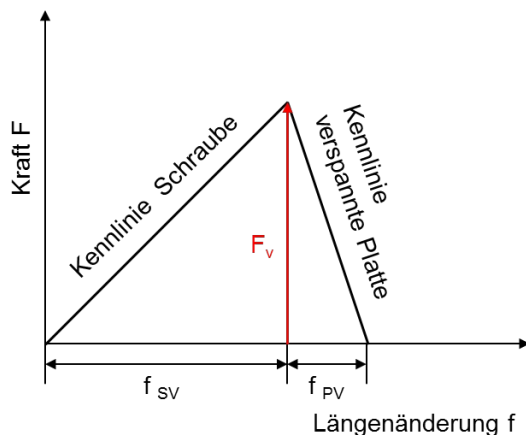


Bild 2.9: Verspannungsschaubild im Montagezustand

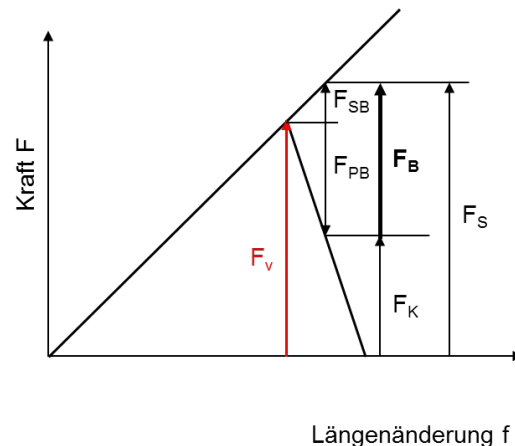


Bild 2.10: Verspannungsschaubild im Betriebszustand mit einer Zug-Betriebskraft

Für den Betriebszustand wird das Verspannungsdreieck um die wirkende Betriebskraft erweitert. Je nach wirkender Krafrichtung wird das Verspannungsdreieck unterschiedlich beeinflusst. Nachfolgend wird der Betriebszustand in Bild 2.10 mit der Betriebskraft F_B als einachsige Zugkraft behandelt. In Abhängigkeit des Kräfteverhältnisses, welches aus den Nachgiebigkeiten von Schraube und Bauteil resultiert, wird die Schraube zusätzlich um den Betrag F_{SB} beansprucht. Die Summe aus Montagevorspannkraft und Schraubenzusatzkraft ergibt die Schraubenkraft F_S . Diese muss sowohl von der Schraube selbst als auch vom Muttergewinde ertragen werden. Um die Streckgrenze der Schraube im Betriebszustand nicht zu überschreiten, gilt nach VDI 2230 für die Schraubenzusatzkraft folgende Einschränkung:

$$F_{SB} \leq 0,1 \cdot R_{p0,2} \cdot A_S \quad [\text{Wie07}] \quad (3)$$

Die verspannten Bauteile erfahren hingegen unter der Zugbeanspruchung eine Entlastung um den Betrag F_{PB} . Erreicht die Kraft F_{PB} den Betrag der Montagevorspannkraft, beträgt die Klemmkraft $F_K = 0 \text{ N}$. Damit ist die Trennfuge der verspannten Bauteile vollständig entlastet. Ab diesem Punkt ist die Schraubverbindung nicht mehr als kraftschlüssige Verbindung wirksam. Wirkt hingegen eine Druck-Betriebskraft auf die verspannte Schraubverbindung ein, vermindert sie die Montagevorspannkraft in der Schraube um F_{SB} und erhöht die Klemmkraft F_K um F_{PB} . Damit muss die Schraube eine geringere Schraubenkraft F_S übertragen.

Fügeprozess

Im Praxisfall wird die Montagevorspannkraft nicht direkt gemessen, sondern über unterschiedliche Kenngrößen und deren Anziehverfahren aufgebracht. Die wichtigsten unter ihnen sind, das

- Drehmomentgesteuerte Anziehverfahren
- Drehwinkelgesteuerte Anziehverfahren
- Streckgrenzengesteuerte Anziehverfahren [Bau93]

Je nach Anziehverfahren und Abschaltgenauigkeit des Schraubsystems unterliegt die Vorspannkraft und das Anzugsmoment Streuungen. Beispielsweise treten infolge einer Reibwertschwankung von $\mu = 0,1$ und $\mu = 0,14$ Vorspannkraftstreuungen von 20% beim drehmomentengesteuerten Anziehen auf [Wie07, S. 341]. Trotz dieser Ungenauigkeit ist das drehmomentengesteuerte Anziehverfahren aus wirtschaftlichen Gründen das am meisten angewendete Verfahren [Wie07]. In dieser Arbeit wird deswegen das drehmomentengesteuerte Anziehverfahren favorisiert. Unter elastischen Verformungsbedingungen und konstanten Reibungsverhältnissen besteht zwischen Anzugsmoment und Vorspannkraft ein linearer Zusammenhang, dessen Proportionalitätsfaktor der Gesamtreibwert ist [Wie07]. Zur Auslegung der Montagevorspannkraft und dem zugrundegelegten Anzugsmoment existieren für die Befestigungsschraubverbindungen Auswahltabellen nach VDI 2230. Darin sind das Anzugsmoment und die Montagevorspannkraft in Abhängigkeit der Schraubenfestigkeitsklasse und des Gesamtreibwertes dargestellt.

Versagensmechanismen

Die vorgespannten Befestigungsschraubverbindungen werden üblicherweise so dimensioniert, dass bei Überbeanspruchung die Klemmkraft überwunden wird und die verspannten Bauteile unter Querkraft rutschen und bei Zugbelastung abheben. Ist die Klemmkraft durch die einwirkende Betriebskraft überwunden wird die Kraftübertragung durch die elastische Vorspannung nicht mehr gewährleistet. Bei querkraftbelasteten Verbindungen liegt in diesem Fall eine Scherlochleibungsbeanspruchung vor. In diesem Fall überträgt die Schraube ausschließlich über Formschluss die Kraft und unterliegt einer Biegebelastung. Dies zieht in der Regel einen Schraubenbruch nach sich. Der Vorspannkraftabfall in zugbeanspruchten Schraubverbindungen führt zur Erhöhung der Schraubenzusatzkraft F_{SB} und damit bei Überbeanspruchung ebenfalls zum Schraubenbruch.

Ursache dieses Versagens ist der Vorspannkraftverlust in der Schraubverbindung. Dies kann durch Setzen der Verbindung und der Relaxation insbesondere bei viskoelastischen Werkstoffen eintreten oder durch das selbstständige Losdrehen der Schraube bzw. Mutter. Letztgenanntes tritt in der Regel durch eine Schwingbeanspruchung senkrecht zur Schraubachse auf [Wie07].

Die Schadensmechanismen, die besonders bei Einschraubverbindungen eintreten können, sind neben dem Schraubenbruch die Gewindeabscherung, die Gewindeumformung und der Kraterausbruch der Einschraubstelle [Sch05]. Das maßgebliche Dimensionierungskriterium ist die Festigkeit der Schraube. Um die Versagensarten Gewindeabscherung und Kraterausbruch der Einschraubstelle zu vermeiden, sind der Schraubendurchmesser und die Einschraubtiefe dementsprechend auszulegen. Nach VDI 2230 ist gefordert, dass bei einer Überbeanspruchung der Sackloch- bzw. Einschraubverbindung die Versagensart Schraubenbruch eintreten soll. Für die Ermittlung der erforderlichen Einschraubtiefe wurden von [Sch05] Schraubenauszugsversuche an unterschiedlich tief eingebrachten Schrauben durchgeführt und die Versagenskennlinie des Gewindes ermittelt. Der Schnittpunkt dieser Versagenskennlinie mit der horizontalen Schraubenbruchlinie kennzeichnet die kritische Einschraubtiefe [Sch05, VDI2230], Vergleich Bild 2.11 [VDI2230, S. 98]. Um den geforderten Schraubenbruch zu provozieren, muss die Einschraubtiefe größer gleich der kritischen Einschraubtiefe gewählt werden.

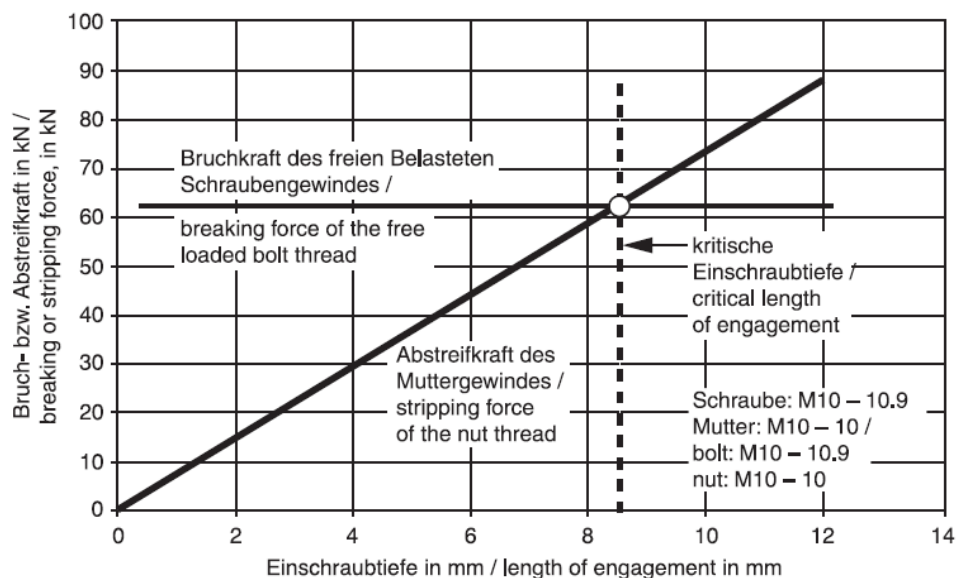


Bild 2.11: Einschraubtiefe und Kennzeichnung der kritischen Einschraubtiefe nach [VDI 2230, S. 98]

2.7.3 Holzschraubverbindung

Einsatzbereich und Beanspruchung

Holzschraubverbindungen finden sowohl im konstruktiven Ingenieurholzbau als auch im Möbelbau ihre Anwendung. Im Holzbau sind sie der Gruppe der stiftförmigen Verbindungsmittel mit Durchmessern von $d_1 \geq 4$ mm zugeordnet [Neu09]. Die Einteilung zu anderen stiftförmigen Verbindungsmitteln im Holzbau ist umfassend in [Eck12, Neu09] dargestellt. Üblicherweise werden die Holzschraubverbindungen flächig, d.h. in einer Gruppenanordnung je Verbindungsstelle verbaut [Neu09]. Sie werden sowohl parallel (auf Herausziehen) als auch senkrecht (auf Abscheren) zur Stiftachse beansprucht (Bild 2.12) [Neu09]. Wobei der Vorteil von Holzschrauben in der hohen Tragfähigkeit parallel zur Stiftachse liegt, dementsprechend in der Übertragung von Zugkräften in benannter Richtung. Daher sind Holzschraubverbindungen vorrangig so zu konstruieren, dass die Schraube auf Auszug (Kraft parallel zur Stiftachse SA) und nicht auf Abscheren (Kraft senkrecht zur SA) beansprucht wird [Bla03]. Holzschraubverbindungen für Holzbaukonstruktionen werden z. B. für Anschlüsse zwischen Haupt- und Nebenträger [Fre10] und als Querkzug- und Querdruckverstärkung in Holzbauteilen verwendet [Bej05, Ste10, Ste11]. Durch die schräge Anordnung der Schrauben (Stiftachse 45° zur Faserrichtung) werden sie belastungsgerecht auf Auszug beansprucht, wo hingegen parallel zur Trennfuge Querkkräfte übertragen werden [Bla03]. Holzschrauben größerer Dimensionen ($d_1 < 8$ mm) erfahren unabhängig von der Vorzugsbelastungsrichtung wachsende Bedeutung in scherlochleibungsbeanspruchten Überlappungsverbindungen des Holzbaus.

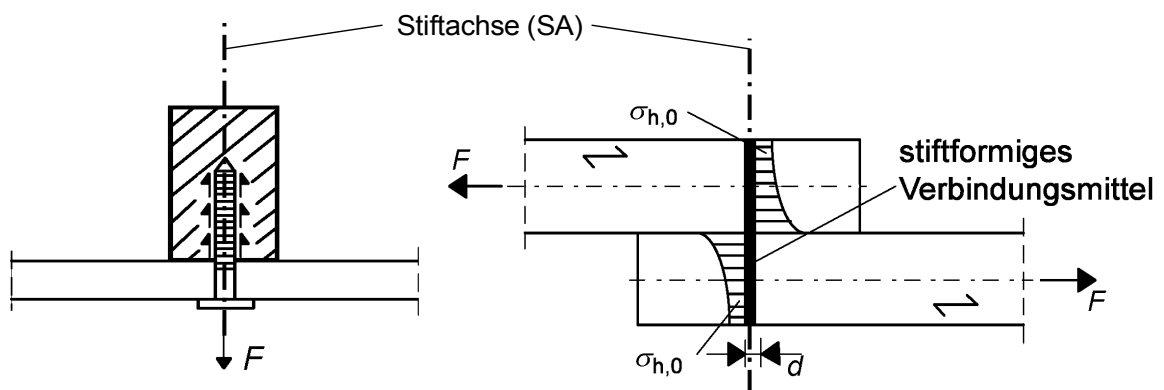


Bild 2.12: Hauptbelastungsrichtungen von Holzschraubverbindungen, Herausziehen (links) und Abscheren (rechts) nach [Neu09, S. 189 f]

Im Möbelbau werden vorwiegend die gewindeformenden Schrauben wie Spanplatten-schrauben, Universalschrauben (Spax), Euroschrauben, Conformatverbinder, Hilo-schrauben [Wag93] und Schnellbauschrauben verwendet [Eck74]. Die Schnellbauschraube ist dabei das meist eingesetzte Verbindungsmittel [Wan07]. Untersuchungen zu Holzschraubverbindungen im Möbelbau führten [Eck74, Eck75, Erd02, Eck88, Vas04,

Gue07, Cas85, Tro84, Wag93] insbesondere an den für den Möbelbau relevanten Holzspan- und Holzfaserwerkstoffen durch. Schwerpunkt dieser Untersuchungen liegt auf Werkstoffeinflüsse, Eigenschaftskorrelationen und konstruktiven Merkmalen der Verbindungsstelle. Dabei wird die Zielstellung verfolgt, die Schraube möglichst schnell und ohne zusätzliches Vorbohren zu montieren.

Vorspannkraft und -relaxation

Untersuchungen an definiert vorgespannten Holzschraubverbindungen sind kaum durchgeführt worden, mit Ausnahme der artverwandten Einschraubverbindungen mit Gewindeeinsätzen (Bild 2.7) für Holzkonstruktionen im Maschinen- und Anlagenbau [Eck12]. Die darin hinsichtlich der Vorspannkraftrelaxation untersuchten Insertverbindungen wurden mit einer Montagevorspannkraft von maximal 4,5 kN beaufschlagt, welche innerhalb der ersten 200 h auf 60% der Anfangsvorspannkraft relaxiert [Eck12]. Um eine Klemmkraft zwischen zwei zu verspannenden Bauteile zu erzeugen, setzte STEILNER Doppelgewindeschrauben mit unterschiedlicher Gewindesteigung ein [Ste11, Ste14]. Untersuchungen zur Vorspannkraftrelaxation an Vollgewindeschrauben in Vollholz belegten eine Reduzierung der Vorspannung von 85 % – 75 % nach 32 Stunden [Ste14]. Zur Minimierung der Vorspannkraftrelaxation ist das Nachziehen der Schraubverbindung im Holzbau praxisrelevant. So zeigte das Nachziehen von Bolzenverbindungen einen positiven Effekt, um die Relaxationsneigung zu reduzieren [Moe70]. Inwiefern diese Maßnahme auf Holzschraubverbindungen übertragen werden kann ist offen. Zudem bleibt die Fragestellung nach einem definierten Nachziehintervall offen.

Gewindegeometrie

Selbstbohrende Holzschrauben (Bild 2.7) für tragende Anwendungen sind genormte Schrauben nach DIN 96, DIN 97 und DIN 571 mit Gewindegeometrie nach DIN 7998 und bauaufsichtlich zugelassene Holzschrauben (gehärtet) [Bla03]. Bild 2.13 stellt die Gewindegeometrie einer Holzschraube mit Nenndurchmesser $d_1 = 4$ mm nach DIN 7998 dar. Mit zunehmendem Nenndurchmesser der Schraube nimmt die Gewindesteigung P und der Innendurchmesser d_3 zu. Der Flankenwinkel von 60° ist gleichbleibend.

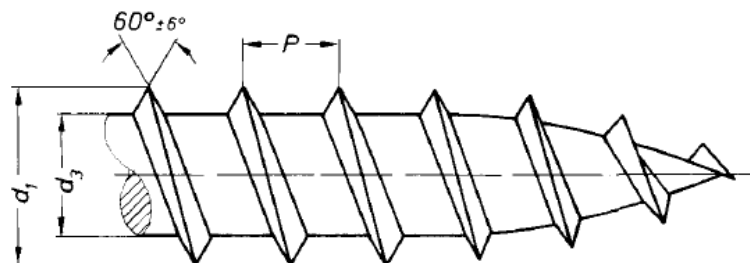


Bild 2.13: Holzschraubgewinde nach DIN 7998 mit $d_1 = 4$ mm, $d_3 = 2,8$ mm, $P = 1,35$ mm

Versagensmechanismen und Dimensionierung

Bei Überbeanspruchung der auf Herausziehen belasteten Schrauben treten in einschneitigen Holzschraubverbindungen die Schadensszenarien Schraubenauszug, Schraubenbruch und Kopfdurchzug auf. Holzschraubverbindungen im Holzbau werden gegen Schraubenauszug und Abscheren (Belastung senkrecht zur Stiftachse) nach dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept des Eurocodes 5 dimensioniert. Holzschrauben mit Durchmessern $d_1 < 8$ mm werden bei Beanspruchung senkrecht zur Stiftachse (Abscheren) wie Nägel, Schrauben mit Nenndurchmesser $d_1 > 8$ mm wie Bolzen bemessen [DIN1995]. Es gilt das Fließmoment des Verbindungsmittels und die Lochleibungsfestigkeit des Holzwerkstoffes zu berücksichtigen. Eine auf Abscherung beanspruchte Schraubverbindung muss mindestens zwei Holzschrauben besitzen [DIN1052]. Dies ist auf die notwendige Sicherheit bei möglichem Einschrauben in eine Fehlstelle und auf die notwendige Klemmwirkung zurückzuführen [Neu09]. Eine konkrete Angabe zur Klemmwirkung, die mit einer Vorspannung der Verbindung einhergeht, wird nicht spezifiziert.

Die Bemessung der Tragfähigkeit auf Schraubenauszug erfolgt nach dem charakteristischen Wert des Ausziehwiderstandes R_d . In der Berechnung des Ausziehwiderstandes gehen die Größen Rohdichte, Einschraublänge und Schraubendurchmesser ein. Werkstoffart, Nutzungsklasse und Lastwirkungsdauer werden über den Modifikationsbeiwert k_{mod} berücksichtigt. Der Teilsicherheitsbeiwert berücksichtigt den Grenzzustand der Tragfähigkeit [DIN1995]. Das Formelwerk mit den entsprechenden Auswahltabellen zur Bemessung ist ausführlich in [DIN1995, DIN1052] dargestellt. Es gilt zu beachten, dass die auf Herausziehen beanspruchten Schrauben in nur einem Winkelbereich von $\alpha_F = 45^\circ$ bis $\alpha_F = 90^\circ$ zur Holzfaserrichtung eingeschraubt werden dürfen. Das Einschrauben in das Stirnholz (0° - Faserrichtung) führt zu einer deutlich reduzierten Tragfähigkeit, wodurch die Schraubverbindungs Bemessung sowohl auf Abscheren als auch auf Auszug nicht in Rechnung gestellt werden darf [Neu09].

Als Kopfdurchzug wird das Versagen des verschraubten Bauteils verstanden, wenn nach Überbeanspruchung der Schraubenkopf durch das Anbauteil gezogen wird. Um den Bemessungswert Widerstand gegen Kopfdurchziehen zu vergrößern, ist der Schraubenkopfdurchmesser durch geeignete Unterlegscheiben zu vergrößern. Nach DIN 1052 sollte jedoch der Schraubenkopfdurchmesser bzw. Scheibendurchmesser kleiner gleich 35 mm betragen [DIN1052].

Das Spaltbruchversagen tritt in der Regel bereits während der Schraubmontage auf. Um dieses Versagen zu verhindern, ist das Vorbohren der Verbindungsstelle sowie das Einhalten holzwerkstoffabhängiger Mindestabstände notwendig. Weiterführendes Wissen zu Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit, zur Bemessung und zum Spaltverhalten von Verbindungen mit selbstbohrenden Schrauben im Holzbau wurden vorwiegend in [Bro91,

Hue09, Bla99, Uib12, Ste10, Ste11, Ste14, Uib09, Geh10, Bej05, Rin12, Pir09] an Vollholz und Brettschichtholz erarbeitet.

Verbindungseigenschaften und deren Einflüsse

Die von der Holzwerkstoffbranche fokussierte Verbindungseigenschaft, die die Qualität der Holzschraubverbindung beschreibt, ist der Ausziehparameter f_{ax} nach DIN EN 1382. Er beschreibt die Auszugskraft des Verbindungsmittels bezogen auf die im Grundwerkstoff tragende Gewindefläche. Nach DIN EN 1382 erfolgt die Berechnung der tragenden Gewindefläche aus dem Produkt des Schraubennendurchmessers und der effektiven Eindringtiefe des Verbindungsmittels. Nach dieser Normung ist der Begriff der Ausziehtragfähigkeit der Ausziehlast gleichgesetzt.

Grundsätzliche Werkstoffeigenschaften, die die Ausziehtragfähigkeit von Holzschrauben aus Vollholz, Brettschichtholz und Brettsperrholz beeinflussen, sind die Rohdichte, die Holzart, der Feuchteanteil, die Faserorientierung, der Einschraubwinkel (Winkel zwischen Schraubenachse und Faserrichtung) und der Lagenaufbau [Kol55, Geh10, Pir09, Rin12, Hue09]. Für Holzwerkstoffe im Anwendungsfeld des Möbelbaus sind es neben der Rohdichte, Einschraubwinkel und Feuchteanteil auch das Dichteprofil, die Dicke der dichten Deckschicht und die innere Partikelbindung von Strands, Spänen und Fasern in OSB, Holzspanplatten und Faserplatten [Vas04, Tro84, Wan07, Wag93, Sem06, Gat09, Mil07]. Je nach Holzwerkstoff sind die benannten Einflüsse unterschiedlich stark ausgebildet und können in den benannten Literaturstellen nachgelesen werden. Weiterführende Untersuchungen zum Schraubenauszugverhalten an verschiedenen Holzwerkstoffen zeigten, dass die Schraubenauszugskraft mit steigender Einschraublänge zunimmt und ein linearer Zusammenhang zugrunde liegt [Pir09, Wag93].

Hinsichtlich der Merkmale Vorbohrung und Schraubendurchmesser liegen keine einheitlichen Aussagen vor. *ECKELMANN* schlägt eine optimale Vorbohrung von $0,85 \times d_1$ bis $0,9 \times d_1$ für MDF [Eck88], *MILJKOVIC* eine Vorbohrung von $0,8 \times d_1$ bis $0,9 \times d_1$ in Spanplatten und OSB vor [Mil07]. In [Pir09] konnte hingegen kein Zusammenhang zwischen Vorbohrung und Schraubenauszugskraft in Vollholz festgestellt werden. *PIRNBACHER* stellte mit größerem Schraubendurchmesser ein Sinken der Schraubenauszugskraft in Brettschichtholz fest. In [Wag93] werden mit größeren Schraubendurchmesser höhere Auszugskräfte in Stabplatten erreicht. Bei Spanplatten und MDF hatte der Schraubendurchmesser hingegen keinen Einfluss [Wag93]. Konstruktive Montageempfehlungen, die im Eurocode 5 und der Norm DIN 1052 beschrieben sind, beziehen sich vorrangig auf Abscheren beanspruchter Holzschraubverbindungen und sind gleichwertig auf Herausziehen beanspruchter Holzschraubverbindungen übertragbar. Die Festlegungen für die Vorbohrung der Verbindung, die Mindesteinschraubtiefe, die Schraubenanzahl je Verbindung und die Schraubenabstände werden in Abhängigkeit der Rohdichte, des Schraubennendurchmessers, der ggf. vorhandenen Vorbohrung und des

Holzfaserrichtung differenziert. Beispielsweise beträgt für eine Holzschraube mit Nenn-durchmesser $d_1 = 6 \text{ mm}$, die senkrecht zur Faserrichtung eingeschraubt wird,

der Kernlochdurchmesser: (4)

die Einschraublänge: (5)

der Mindestabstand: [DIN 1052]. (6)

Haupteinflussgröße auf die Auszugsfestigkeit von Schrauben aus Holz und Holzwerkstoffen, die in umfassenden Untersuchungen der zurückliegenden Jahrzehnte belegt und in Berechnungen nach [DIN 1052] berücksichtigt wird, ist die Rohdichte [Kol55, Vas04, Gue07, Pir09, Wag93]. Obgleich *ECKELMANN* [Eck75] in Schraubenauszugsversuchen an amerikanischen Laubhölzern eher eine Korrelation mit der Scherfestigkeit des Holzes feststellte als mit der Rohdichte.

Die bisher aufgeführten Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf statische Schraubenauszugsversuche. Dynamische Schraubenauszugsversuche an Spanplatten, Fichten und Buchenholz wurden in [Bro91] mittels Treppenstufenverfahren durchgeführt. Er stellte fest, dass die dynamische Kraft beim Schraubenauszug bei 80% der statischen Kraft liegt. Um ein höheres dynamisches Schraubenhaltevermögen zu erreichen, schlägt *BLASS* größere Schraubendurchmesser und tiefere Einschraublängen vor [Bla91]. *ECKARDT* führte dynamische Auszugsversuche an in Birkenperrholz eingebrachte Schraubinserts durch. Das unverspannte Verbindungsmittel wurde mit 25% bis 90% der statischen Auszugskraft und einer Prüffrequenz von 20 Hz zugschwellend belastet. Dabei zeigte sich, dass die Schraubinserts unterhalb von 45% der statischen Auszugskraft die geforderten 10^7 Lastwechsel standhielten [Eck12]. In [Bur70] wurde die dynamische Ausziehtragfähigkeit unter Zugschwellbelastung von Holzschrauben mit einer Prüffrequenz von $f = 10 \text{ Hz}$ bis zu einer maximalen Lastwechselzahl von $2 \cdot 10^6$ durchgeführt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte, dass bei einer Oberkraft von 45% - 50% der statischen Kurzeitauszugsfestigkeit kein Versagen in Fichten und Kiefernholz vorlag. Teilweise brachen die Schrauben bevor die Schraubenauszugsfestigkeit des Holzes erreicht wurde. In welchem Maß die Einschraublänge und der Vorbohrdurchmesser Einfluss nehmen wird nicht berücksichtigt.

Äußere Einflüsse auf das Auszugverhalten von Schrauben aus Holzwerkstoffen sind neben der Temperatur beim Einschrauben und Herausziehen der Schrauben die Umgebungsfeuchte und dementsprechend die Holzfeuchte [Pir09]. Grundsätzlich nimmt die Schraubenhaltefestigkeit mit steigender Holzfeuchte ab [Gat09]. *PIRNBACHER* stellte an Vollholz senkrecht zur Faserrichtung die größte Schraubenauszugskraft bei 10% Holzfeuchte fest. Sinkt die Holzfeuchte unter 10% nimmt der Spröbruchanteil beim Versagen der Schraubverbindungen zu. Der Auszugswiderstand sinkt hierbei auf 88% ab. Eine steigende Holzfeuchte über 10% führt zum stetigen Abfall der Auszugskraft [Pir09].

Zudem entstehen durch die feuchtigkeitsbedingte Dimensionsänderung Zwängungen im Holz, die zu Rissen in der Verbindungsstelle führen können [Ste11].

Fügeprozess

Der Fügeprozess von gewindeformenden Schrauben in Holzwerkstoffe wurde in [Bla99, Gat09, Uib12] behandelt. BLASS führte Untersuchungen zum Einschraub- und Bruchdrehmoment von unterschiedlichen Schrauben beim Eindrehen in Buchen- und Fichtenholz durch. Er stellte einen linearen Zusammenhang zwischen Eindrehmoment und Schraubendurchmesser fest und betrachtete den dichteabhängigen Schadensmechanismus während des Fügeprozesses. Werden Schrauben beim Eindrehen in Holz geringer Dichte überdreht, so arbeiten sie sich weiter in den Holzwerkstoff ein. Bei Holz höherer Dichte steigt mit zunehmender Einschraublänge das Einschraubmoment auf das Bruchmoment der Schraube an, was zum Abreißen der Schraube führt [Bla99]. Mit zunehmender Rohdichte des Holzes bzw. des Holzwerkstoffes steigt neben der Schraubenzugkraft die Kraft beim Eindrehen der Schraube an. Dies birgt ein größeres Risiko des Spaltens der Einschraubstelle und des Brechens der Schraube beim Einschrauben [Uib12, Bla99]. Maßnahmen um das Spalten des Holzes beim Eindrehen der Schraube zu vermeiden sind das Vorbohren, größere Schraubenabstände und eine entsprechende geometrische Schraubengestaltung, die das Eindrehmoment reduzieren [Uib09, Uib12]. Zu ihnen zählen Bohrspitze, Reibschaff und Fräsrippen am Schraubenkopf [Uib12]. Gemäß DIN 1052 müssen Holzschraubverbindungen mit Durchmessern $d_1 > 8$ mm und Rohdichten über 500 kg/m^3 vorgebohrt werden, um beim Eindrehen der Schraube die Spaltgefahr des Holzes und das Auftreten des Schraubenbruchs zu minimieren [DIN 1052]. GATES untersuchte zusätzlich den Einfluss des Anzugmomentes auf die Auszugsfestigkeit der Schraube aus Spanplatten und stellte fest, dass die hohen Drehmomente während der Schraubmontage zu geringen Auszugskräften führen [Gat09].

Fazit

Aus dem Kenntnisstand zu Holzschraubverbindungen lässt sich feststellen, dass die **Ausziehtragfähigkeit (Bezeichnung nach DIN 1382)** im Wesentlichen von der Rohdichte bestimmt wird. Je nach Holzwerkstoff kommen weitere werkstoffspezifische Parameter zum Tragen, die die Ausziehtragfähigkeit beeinflussen. Konstruktive Verbindungsparameter wie beispielsweise Mindestrandabstand, Vorbohrung und Einschraublänge sind für Holzwerkstoffe im Möbelbau weitestgehend werkstoffspezifisch in den aufgeführten Literaturstellen erarbeitet. Die Schraubengestaltung ist an eine wirtschaftliche Schraubmontage angepasst. Für Anwendungen im Ingenieurholzbau regelt der Eurocode 5 und die DIN 1052 die konstruktive Verbindungsgestaltung. Angaben, die auf Holz-Polymer-Werkstoffe übertragbar sind, können daraus nicht abgeleitet werden, da für diese Werkstoffe abweichende, strukturbedingte Einflussfaktoren zugrunde liegen. Die aufgeführten Arbeiten [Kol55, Vas04, Gue07, Pir09, Wag93, Eck75, Bla99, Gat09, Uib12] zeigten zudem, dass der Fügeprozess um das Einschrauben und Anziehen von Holz-

schraubverbindungen eine untergeordnete Rolle einnimmt. Das ist vorrangig darauf zurückzuführen, dass vorgespannte Holzschraubverbindungen für die klassischen Einsatzzwecke des Holz- und Möbelbaus kaum relevant sind. Das Vorspannen, welches bereits die Verbindungsstelle während des Fügeprozesses belastet und beim Überdrehen zum vorzeitigen Versagen der Verbindung führt, entfällt und zieht damit keine montage technische Problemstellung nach sich.

2.7.4 (Kunststoff-) Direktverschraubung

Einsatzbereich

Der Direktverschraubung kommt aufgrund des reduzierten Arbeitsaufwandes während der Bauteilherstellung und Montage sowie durch das lösbare Verbinden artfremder Werkstoffe eine hohe technische und wirtschaftliche Bedeutung zugute. Im industriellen Umfeld werden Direktverschraubungen von Polymerwerkstoffen mit gewindeformenden Metallschrauben seit Ende der 70er Jahre eingesetzt [Yao11]. Anwendung findet die Direktverschraubung in nahezu allen Industriezweigen, in denen Leichtmetalle und dünnwandige Kunststoffbauteile zum Einsatz kommen, so z. B. Gehäuseteile in der Automobilindustrie, Sportgerätetechnik und Elektronikindustrie [Ehr04]. Für dünnwandige Spritzguss- und Fließpressbauteile ($t < 4 \text{ mm}$) wird zur Realisierung der notwendigen Einschraublänge eine auf die Schraube abgestimmte Einschraubstelle ausgeformt [Dra99]. Bei Extrusionsbauteilen ist der Einschraubdom verfahrenstechnisch nicht ausformbar. Das Einschrauben erfolgt in der Regel stirnseitig (parallel zur Extrusionsrichtung) in kontinuierlich verlaufende Einschraubstellen oder in senkrecht zur Extrusionsrichtung liegende Bohrungen. Direktverschraubungen von Extrusionsprofilen sind vorrangig im Fensterbau verbreitet [Ejo08]. Die Einschraublänge wird bei Extrusionsprofilen senkrecht zur Extrusionsrichtung von der Wandstärke begrenzt.

Definition

Unter Direktverschraubung ist der Vorgang des Eindrehens und des Anziehens der gewindeformenden Schraube in die darauf abgestimmte Einschraubstelle [Ona83, Dra99, Tom00, Ehr04] zu verstehen. Dabei „formt die gewindeformende Metallschraube mit spezieller Flankengeometrie ihr Muttergewinde während des Fügeprozesses“ im Bauteilwerkstoff selbst aus [Tom00]. Das Wissen und das Verständnis um den Fügeprozess und den resultierenden Verbindungseigenschaften von Direktverschraubungen in Polymerwerkstoffen ist umfangreich erarbeitet worden [Ehr04, Ona83, Tom00, Dra99, Yao11]. Schwerpunkte liegen in den Untersuchungen zur Schraubengeometrie, Geometrie der Einschraubstelle, Verschraubungsbedingungen während des Fügens, Verbindungseigenschaften und der Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Direktverschraubung.

Gewindegeometrie

Auf Basis umfangreicher Forschungsarbeiten wurde eine speziell an Kunststoffe angepasste Schraubengeometrie (Bild 2.16) entwickelt, die die Anforderung an geringe Radialdehnung, großer Momentendifferenz, großes Lösemoment, hohe Auszugskräfte, geringen Vorspannkraftabfall und kleinen Toleranzbereich in einer Direktverschraubung [Bri11, Ehr04] erfüllt. Die konstruktiven Merkmale dieser Gewindegeometrie sind eine große Gewindesteigung, ein kleiner Flankenwinkel ($30^\circ - 45^\circ$) und eine große Gewindetiefe [Ona83, Dra99]. Eine Normung für das Schraubengewinde existiert nicht. Daher unterscheiden sich die Schraubengewinde der verschiedenen Schraubenhersteller wie beispielsweise Schriever, Ejot, Plastoform, Ribe, Eska in kleineren und größeren Details.

Montageanzugmoment M_A

Die definierte Schraubmontage bildet die Voraussetzung für das definierte Aufbringen der Vorspannkraft und eines reproduzierbaren Schraubprozesses in der Praxis. Die Vorspannkraft in der Verbindung, die beim Verspannen der Schraube gegen das Anbauteil entsteht, wird im Praxisfall nicht direkt gemessen, sondern über das Montageanzugmoment M_A eingestellt [Ehr04]. Um das Anzugmoment bei einer definierten Vorspannkraft zu ermitteln, sind Anzugversuche notwendig. Aus den erhaltenen Anzugmoment-Vorspannkraft-Kurven kann das Anzugmoment für eine konkrete Verschraubung ermittelt werden. Dieses Vorgehen beruht auf der Annahme, dass zwischen Anzugmoment und Vorspannkraft ein linearer Zusammenhang vorliegt, dessen Proportionalitätsfaktor der Haftreibwert ist [Erh93]. Reibwertschwankungen sind je nach Werkstoff, Temperaturentwicklung während des Einschraubens und infolge schwankender Fertigungstoleranzen und Rauheiten der Verbindungsmittel zu berücksichtigen.

Das Montageanzugmoment wird auf Basis experimenteller Überdrehversuche ermittelt. Während dieser Überdrehversuche wird das Eindrehmoment M_E und das Überdrehmoment $M_{\bar{U}}$ der Verschraubung ermittelt. Aus diesen experimentell ermittelten Momenten ist das Montageanzugmoment M_A nach Formel 7 zu berechnen [DVS2241-1, Ehr04, Wue16]. Der Faktor k berücksichtigt dabei mögliche Schwankungen in der Abschaltgenauigkeit pneumatischer und elektrisch betriebener Schraubsysteme [Ehr04, Ona83]. Bei Direktverschraubungen von NE-Metallen wird das Anzugmoment üblicherweise auf 50% der Momentendifferenz festgelegt [Kra18].

$$M_A = M_E + k \cdot (M_{\bar{U}} - M_E) \quad [\text{Ona83}] \quad (7)$$

Montageprozess und -parameter

Bild 2.14 stellt den schematischen Drehmoment- und Vorspannkraftverlauf beim Direktverschrauben einer gewindeformenden Schraube am Beispiel eines Spritzgussbauteiles dar. Die Montagegröße ist das Drehmoment als Funktion der Einschraublänge bzw. des Drehwinkels. Der Drehmoment- und Vorspannkraftverlauf beschreibt die charakteristischen Prozessphasen a) Eindrehen (ohne Vorspannung), b) Anziehen (Aufbringen der

Vorspannkraft nach Kopfauflage) und c) Überdrehen (Versagen der Verbindung) der Direktverschraubung.

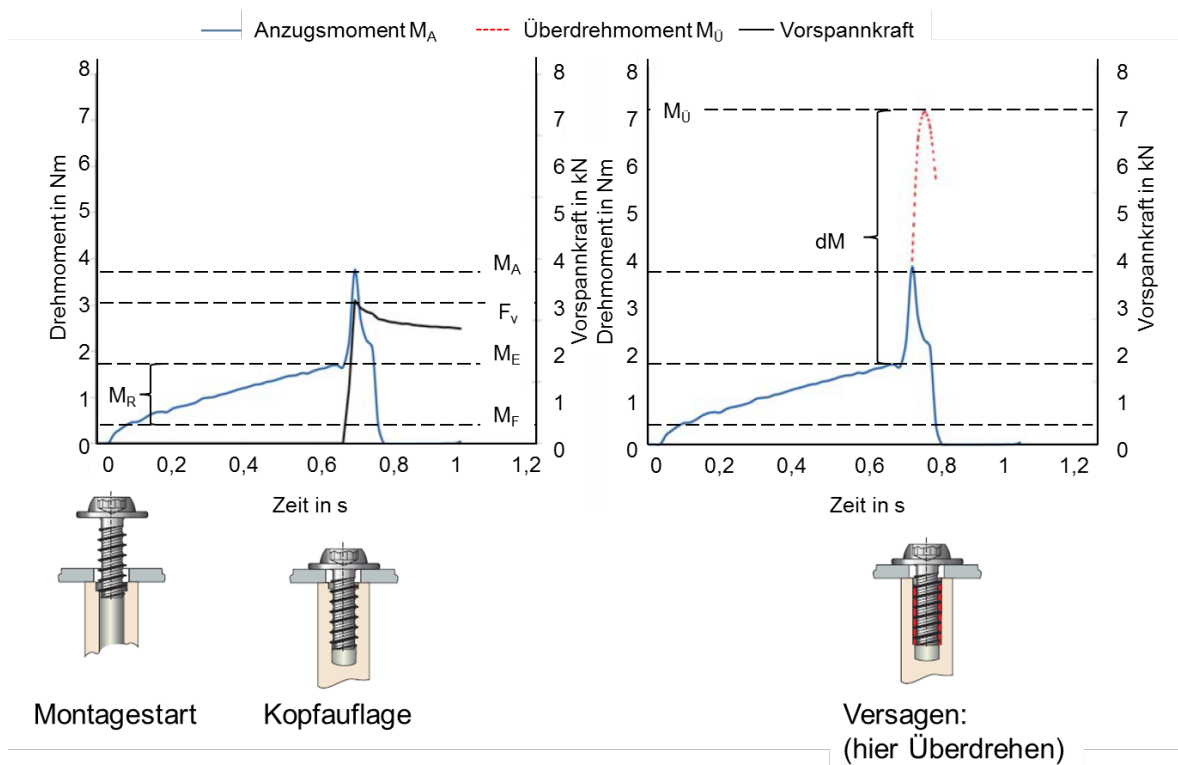


Bild 2.14: Drehmoment- und Vorspannkraftverlauf beim Montageprozess von Direktverschraubungen nach [Ehr04, Ejo15], $n = \text{konstant}$

Beim Eindrehen der Schraube bis zum ersten Gewindegang wird das Gewindeformmoment M_F erreicht. Da bei jeder Umdrehung der Schraube ein neuer Gewindeabschnitt ausgeformt wird, bleibt das Gewindeformmoment über die Einschraublänge konstant. Das Gewindereibmoment M_R nimmt hingegen bis zur Kopfauflage der Schraube auf dem Anbauteil zu, da mit tieferer Einschraublänge die Reibkontakte zwischen Gewindeflanken und Werkstoff zunehmen. Liegt der Schraubenkopf auf dem Anbauteil auf, ist das Eindrehmoment M_E erreicht. Es setzt sich zusammen aus Gewindeform- und Gewindereibmoment. Beim Weiterdrehen der Schraube wird die Vorspannkraft in der Verbindung wirksam. Das Moment, welches beim Erreichen der gewünschten Vorspannkraft anliegt, wird als Anzugsmoment M_A definiert. Es setzt sich zusammen aus Eindrehmoment M_E und Kopfreibmoment M_{KR} . Im Falle des Überdrehens der Schraube versagt die Verbindung, welches durch das Überdrehmoment M_U gekennzeichnet ist. Ab diesem Versagenspunkt fällt die Vorspannkraft rapide ab. Als Zielkriterium für eine hohe Montagesicherheit sollte eine große Momentendifferenz dM zwischen Eindreh- und Überdrehmoment sichergestellt sein. Die Momentendifferenz wird auch als Arbeitsbereich der Schraube beschrieben [Dra99]. Er resultiert aus einem geringen Eindrehmoment M_E und einem hohen Überdrehmoment M_U . Als weiteres Zielkriterium ist die maximal übertragbare Vorspannkraft beim Überdrehen der Schraube definiert.

Prinzip der Verschraubung, Beanspruchung und Versagen der Einschraubstelle

Das Prinzip der Direktverschraubung beruht auf Umformvorgängen im Gewindeeingriff und setzt eine elastische und plastische Verformung des Bauteilwerkstoffes voraus [Ona83]. Beim Eindrehen der Schraube wird der Werkstoff in Flankennähe verdrängt und umgeformt. Dabei entsteht parallel zur Schraubenachse in Abhängigkeit der Flanken-geometrie und Flankenüberdeckung ein Formschluss. Aufgrund wirkender elastischer Rückstellkräfte des verdrängten Materials wirkt eine zusätzliche Kraft auf die Schraube [Ona83]. Beim Anziehen der Schraube wird die Kraftkomponente parallel zur Schraubenachse weiter verstärkt. Belastungen denen der Bauteilwerkstoff während der Montage standhalten muss, sind gemäß Bild 2.15 a) Längskraftschub entlang der Schrauben-umhüllenden infolge der Vorspannkraft, b) Radialspannungen infolge Material-verdrängung, c) Flächenpressung auf die Gewindeflanken und e) Druckspannungen unter dem Schraubenkopf [Ehr04, S. 54]. Mit zunehmender Vorspannung der Verbindung nehmen die Spannungen in der Einschraubstelle zu. Die zusätzlich zur Montagebelastung auftretende Betriebslast führt in der Verbindungsstelle zu einem komplexen mehr-dimensionalen Spannungszustand, der die Berechnung der Schraubverbindung erschwert [Ehr04, Ona83, Dra99].

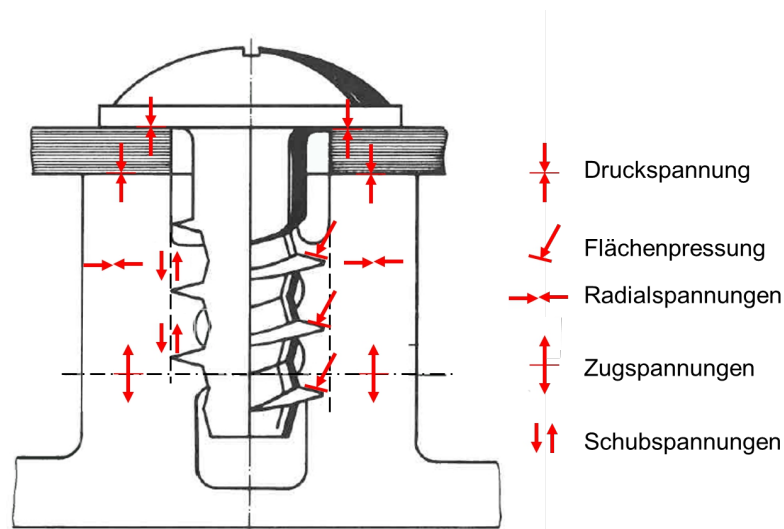


Bild 2.15: Belastungen in der Einschraubstelle, Grafik erweitert [Gro93]

Das Versagen der Direktverschraubungen kann bei Überbeanspruchung parallel zur Schraubachse sowohl während der Montage als auch im Betriebszustand auftreten. Auf Basis der in [Ehr04] dargestellten Versagensmechanismen von spritzgegossenen Einschraubtuben, sind in Extrusionsvollprofilen die Versagensfälle in Tabelle 2.4 zu erwarten.

Tabelle 2.4: Versagensfälle der Direktverschraubung in Extrusionsprofilen [Ehr04]

Versagensfall	Ursache
Schraubenauszug	zul. Scherspannung überschritten, Schubversagen entlang der Schraubenumhüllenden
Schraubenbruch	Zugfestigkeit der Schraube erreicht, Torsionsfestigkeit der Schraube während der Montage erreicht, Verankerungsfläche zu groß
Rissbildung	Radialspannungen zu groß Randabstand bzw. Kernlochdurchmesser zu gering

Zur Vermeidung dieser Versagensfälle existieren Bemessungsformeln die in [Ehr04] zusammengefasst sind. Um die Tragfähigkeit zu erhöhen können Schraubenquerschnitte, Kernlochdurchmesser, Einschraublängen und Wandstärken der Einschraubstelle angepasst werden.

Dimensionierung der Einschraubstelle

Die Dimensionierung der Einschraubstelle wird in [Dra99] als optimal beschrieben, wenn es bei Überbeanspruchung zu einem gleichzeitigen Auftreten aller Versagensformen (Tabelle 2.4) bei gleicher Kraft kommt. In diesem Fall sind alle Komponenten in gleichem Maße dimensioniert. Um hingegen ein reparables Versagen zu provozieren, sollten die Komponenten so dimensioniert sein, dass ein Schraubenauszug im Schadensfall eintritt. Dies ermöglicht die einfache Reparatur der Verbindungsstelle mit größeren Schraubendurchmessern oder dem Einsatz von Schraubinserts.

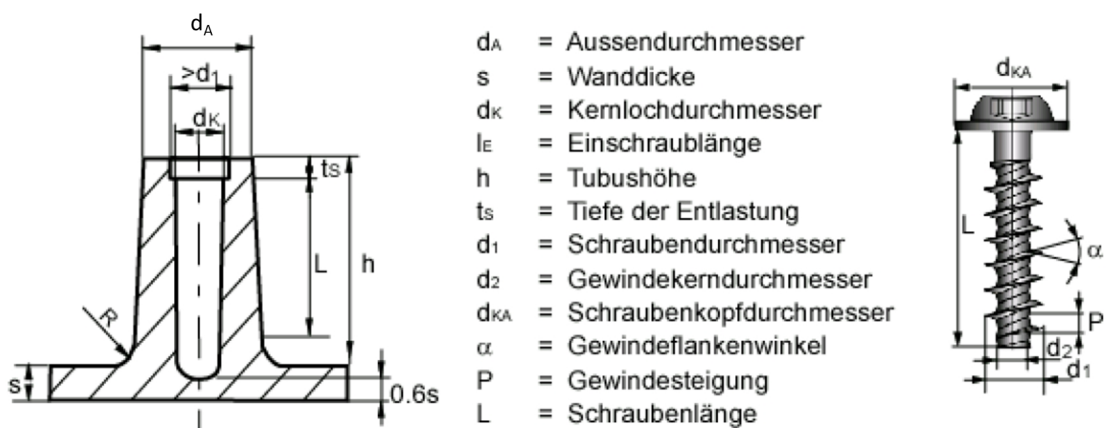


Bild 2.16: Auslegung der spritzgegossenen Einschraubstelle für Kunststoff-Direktverschraubungen nach DVS 2241-1

Für die Dimensionierung der spritzgegossenen Einschraubstelle (Bild 2.16) existieren die Richtlinie DVS 2241-1 und Auslegungsempfehlungen verschiedener Schraubenhersteller

[Sch15, Ejo15, Wue16]. Dabei bestimmt der Schraubinnenndurchmesser d_1 die Dimensionierung der Einschraubstelle. Zur überschlägigen Auslegung der spritzgegossenen Einschraubtuben sind für Anwendungen in der Kunststoffbranche folgende Bemessungen empfehlenswert [DVS2241-1]:

Einschraublänge: (8)

Kernlochdurchmesser: (9)

Entlastungsbohrungstiefe: (10)

Tubus-Außendurchmesser: (11)

Diese werden für die Dimensionierung der Einschraubstelle an WPC-Extrusionsprofilen als Grundlage hinzugezogen. Der Tubusaußendurchmesser d_A , der den Abstand der Schraube zur Außenwandung der rotationssymmetrischen Einschraubstelle beschreibt, kann für die in dieser Arbeit verwendeten WPC-Extrusionsprofile nicht hinzugezogen werden. Er wird durch die Parameter Bauteildicke t und Bauteilbreite B ersetzt.

Verbindungseigenschaften und deren Einflüsse

Technisch relevante Verbindungseigenschaften sind:

- die von der Verbindung übertragbare Vorspannkraft F_v ,
- deren zeitlicher Abfall (Vorspannkraftrelaxation)
- die statische und dynamische Verankerungsfestigkeit bzw. Auszugskraft F_{ax}
- die stat. und dynam. Verbindungstragfähigkeit, -steifigkeit im verspannten Zustand.

In Bild 2.17 werden für diese Arbeit relevante Wechselwirkungen beschrieben, die zwischen den konstruktiven sowie montage-technischen Parametern und den daraus resultierenden Verbindungseigenschaften und Montagekenngrößen bestehen.

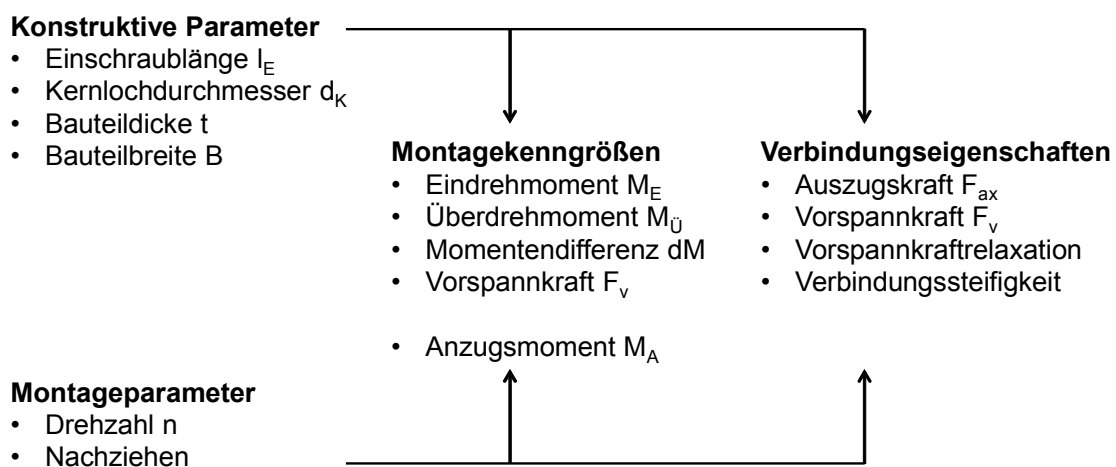


Bild 2.17: Parameterwechselwirkung bei Direktverschraubungen auf Basis [Ona83, Dra99, Tom00]

Die Einschraublänge und der Kernlochdurchmesser bestimmen unter Berücksichtigung der Gewindegeometrie die zur Kraftübertragung vorhandene Verankerungsfläche im Bauteilwerkstoff. Da der Bauteilwerkstoff eine deutlich größere Nachgiebigkeit als die Verbindungsmittel besitzen, verteilt sich die Kraft auf alle Gewindeflanken [Ona83]. Eine Vergrößerung der tragenden Fläche, die mit einer größeren Flankenüberdeckung einhergeht, ermöglicht das Aufbringen größerer Vorspannkkräfte und führt gleichermaßen zu größeren Auszugskräften im Versagensfall. Die axiale Belastbarkeit der Verbindung steigt mit zunehmender Einschraublänge linear bis zum Schraubenbruch an [Dra99, Tom00]. Das Versagen kann sowohl durch das Schraubenbruchmoment während der Schraubmontage als auch durch Erreichen der Schraubenbruchkraft im Betriebszustand eintreten.

Kleine Kernlochdurchmesser führen zu einer großen Flankenüberdeckung und damit zur Steigerung der axialen Belastbarkeit, gleichzeitig nimmt aber je nach Flankengeometrie die Radialspannung im Bereich der Gewindeflanke zu. Dies hat zur Folge, dass es bereits beim Eindrehen der Schraube zum Aufreißen der Einschraubstelle kommen kann. Eine entsprechende Gegenmaßnahme ist die Vergrößerung der Wandstärke.

Um einen Kompromiss zwischen hoher Auszugskraft und geringer Radialspannung in der Einschraubstelle herauszuarbeiten, kann auf das Kriterium der maximalen Momemten-differenz (Bild 2.18) zurückgegriffen werden. Anhand dieses Kriteriums lässt sich der optimale Kernlochdurchmesser aus den Überdrehversuchen ableiten. Er stellt dabei den Kompromiss zwischen hoher Auszugskraft und geringer Radialspannung der Einschraubstelle dar. Möchte man darüber hinaus die Auszugskraft weiter erhöhen, ist die Einschraublänge anzupassen.

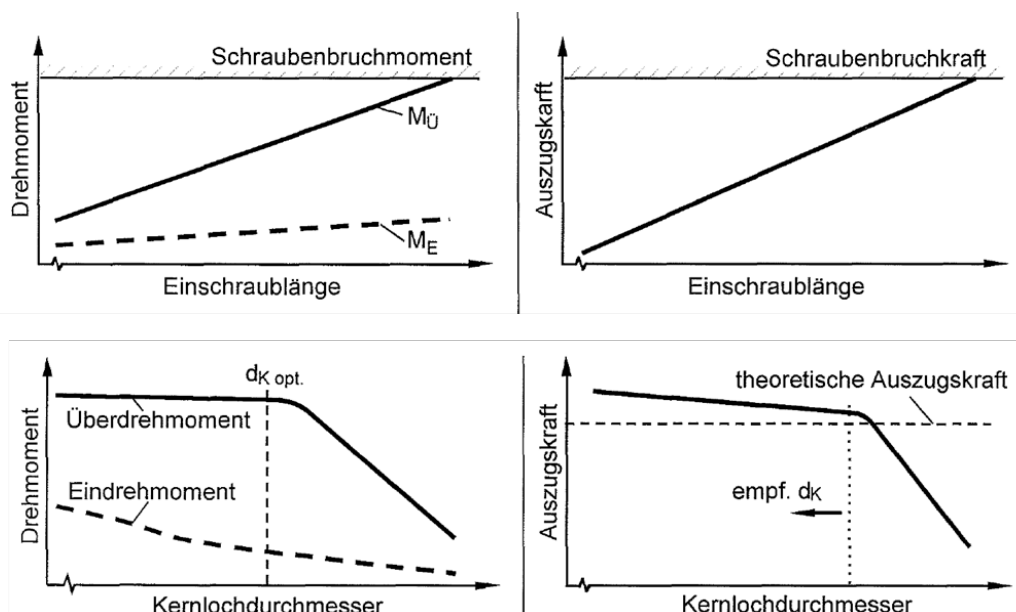


Bild 2.18: Schematische Darstellung der Montagekenngrößen und Verbindungseigenschaften in Kunststoff-Direktverschraubungen [DVS 2241-1]

Untersuchungen in [Tom00] an einer Direktverschraubung mit Nenndurchmesser von $d_1 = 5 \text{ mm}$ zeigten, dass die Flächenvergrößerung um 20% durch größere Einschraub-längen zu einer 20%-igen Vergrößerung der axialen Belastbarkeit führte. Wo hingegen die Flächenvergrößerung um ca. 20% durch kleinere Kernlochdurchmesser nur eine Erhöhung der Auszugskraft um 8% mit sich brachte [Tom00, S. 56]. *ONASCH* empfiehlt die Einschraublänge möglichst groß zu wählen, da die Momentendifferenz, die axiale Belastbarkeit und die Vorspannkraft mit größeren Einschraub-längen zunehmen [Ona83 S. 148]. Die auf die Montagekenngrößen und Verbindungseigenschaften Einfluss nehmenden Montageparameter sind die Einschraubgeschwindigkeit (Montagedrehzahl) und das Nachziehen der Schraubverbindung. Praxisrelevante Einschraubgeschwindigkeiten liegen bei 100 - 1000 U/min [DVS2241]. Maximale Montagedrehzahlen sind in Abhängigkeit der Schraubengeometrie und des zu verschraubenden Polymerwerkstoffes in den Montageempfehlungen der jeweiligen Schraubenhersteller angegeben [Ejo15, Sch15, Wue16, Mue99]. Grundsätzlich ist mit höheren Einschraubdrehzahlen die durch Reibung initiierte Temperaturerhöhung im Bereich des Flankeneingriffes zu beachten [DVS2241, Ehr04, Ona83]. Die Temperaturerhöhung kann je nach Werkstoff die Reibzahlen und die Werkstofffestigkeit herabsetzen und die Werkstoffrelaxation beschleunigen. Je nach Werkstoff, Schraubengeometrie und Einschraubstelle beeinflusst dieser Aspekt die Montageparameter [Ona83]. Demgegenüber besteht der Sachverhalt, dass mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit respektive höheren Einschraubgeschwindigkeiten, die Werkstofffestigkeit erhöht werden kann. Dies würde das Erreichen von höheren Überdrehmomenten und Vorspannkraften mit zunehmenden Einschraubdrehzahlen fördern [Erh93, Dra99]. Da sich beide Effekte gegenseitig überlagern kann es je nach geometrischen und werkstoffbedingten Einflüssen zum Anstieg oder Abfall der Montageparameter kommen [Ona83]. Aus diesem Grund ist die Überprüfung des Drehzahl-einflusses auf die Montageparameter für jede Schraubpaarung zu überprüfen. Beispielsweise untersuchte [Dra99] im Überdrehversuch mit Kopfreibung den Drehzahl-einfluss auf die Momentendifferenz und die erreichte Vorspannkraft in glasfaser-verstärktem Polyamid (PA6-GF30). Er stellte fest, dass die Montagekennwerte unempfindlich auf verschiedene Einschraubgeschwindigkeiten reagieren. Daher sind unter Voraussetzung einer exakten Schraubersteuerung hohe Drehzahlen beim Anziehen der Direktverschraubung möglich [Dra99]. Die Firma Ejot zeigte an Überdrehversuchen der Schraube Delta PT in glasfaserverstärktem Polyamid, dass Drehzahlen bis 1000 U/min problemlos angewendet werden können [Ejo15]. Im Gegensatz dazu ist in den Montagehinweisen der Firma Würth für die Schraube WÜPLAST® die Einschraubgeschwindigkeit auf 800 U/min begrenzt. *TOME* untersuchte den Einfluss des Montagevorganges auf den Verlauf der Vorspannkraft und stellte fest, dass bei höheren Drehzahlen erhöhte Vorspannkraftrelaxation direkt nach der Montage auftritt [Tom00]. Das führt er auf die bei höheren Geschwindigkeiten zunehmende Friktionserwärmung des Kunststoffes im Bereich des Flankeneingriffes zurück [Tom00]. Eine mehrstufige Schraubmontage aus schnellem Eindrehen und langsamen Anziehen der Schraube, wie sie mit moderner

Schraubtechnik realisierbar ist, wird nicht explizit empfohlen. YAO verwendet in seiner Dissertation einen zweistufigen Montagevorgang, der sich an typisch industriellen Anwendungen orientiert [Yao11]. Der Montagevorgang besteht aus dem drehwinkelgesteuerten Einschrauben mit 500 U/min auf $\alpha = 1700^\circ$ und dem vorspannkraftgesteuerten Anziehen mit 50 U/min auf $F_v = 1,5 \text{ kN}$ [Yao11]. Mit dem langsameren Anziehen der Schraube möchte er das schockartige Abschalten bei einer gewünschten Vorspannkraft vermeiden. Er setzt den langsamen Schraubenanzug nicht in Zusammenhang mit einer eventuell geringeren Vorspannkraftrelaxation.

Der Einfluss des Nachziehens auf den Vorspannkraftverlauf wurde in [Mue99] näher betrachtet. Es zeigt sich, dass das Nachziehen der Schraubverbindung eine geringere Vorspannkraftrelaxation nach sich zieht und damit eine größere Restvorspannkraft in der Verbindung erhalten bleibt [Mue99, Ehr07]. Der sich durch das Nachziehen einstellende positive Effekt wird durch einen erneuten Fließprozess des Kunststoffes erklärt, der für eine stabilere Flankenüberdeckung sorgt. Mit der gleichmäßigen Verteilung der Druckspannung auf die Gewindeflanken wird die Tragfähigkeit des Kunststoffes im Gewindeeingriff gesteigert [Mue99]. Das Nachziehen der Verbindung führt nachweislich zu höheren Restvorspannkräften. [Mue99] fand in seinen Untersuchungen heraus, dass es einen idealen Nachzugzeitpunkt gibt, der jedoch für jede Schrauben-Kunststoffpaarung separat ermittelt werden muss [Mue99]. Grundsätzlich gilt, je kürzer das Nachziehintervall, umso effektiver ist diese Maßnahme.

Vorspannkraft und -relaxation

Die während der Schraubmontage aufgebrachte Vorspannkraft sinkt aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens in der Verbindungsstelle ab. Dies ist in [Tom00] mit Moleküumlagerungsvorgängen beschrieben. Der Vorspannkraftverlust ist innerhalb der ersten 20 min bis zu einer Stunde am größten [Tom00, Mue99, Dra99] und schreitet mit stetig abnehmender Relaxationsgeschwindigkeit über einen langen Zeitraum fort. Dabei treten bereits während des Fügens Relaxationseffekte beim Aufbringen der Vorspannkraft auf. Erhöhte Einsatztemperaturen beschleunigen dabei die Relaxationskinetik. Nach [Dra99] ist beispielsweise bei Direktverschraubungen in PA6-GF30 ein Vorspannkraftabfall um mindestens 30% bei Raumtemperatur innerhalb einer Zeitdauer von 100 h zu erwarten. Das Ziel für den Konstrukteur besteht nun darin, die Schraubenvorspannkraft mit geeigneten Maßnahmen über den Lebenszyklus eines Produktes konstant zu halten bzw. die Unterschreitung eines geforderten Vorspannkraftgrenzwertes zu vermeiden [Vas09]. Die für diese Maßnahmen notwendigen Zusammenhänge und Einflussgrößen wurden in den Arbeiten von [Tom00] und [Dra99] für Thermoplaste erarbeitet. In den genannten Arbeiten wurde aufgezeigt, dass

- eine höhere Anfangsvorspannkraft eine stärkere Relaxationsneigung hervorruft [Tom00] und sich langfristig ein ähnliches Restvorspannkraftniveau einstellt.

- zwischen der Restvorspannkraft und der Anfangsvorspannkraft ein linearer Zusammenhang in Abhängigkeit der Verbindungs- und Umgebungsbedingungen im linear-viskoelastischen Bereich des Materials vorliegt [Tom00]. Dies bedeutet, dass die absolute Vorspannkraftrelaxation bei höheren Anfangsvorspannkraften stärker ausgeprägt ist [Tom00, DVS 2241].
- ein schnelleres Anziehen der Schraubverbindung zu einer größeren Vorspannkraftrelaxation führt [Tom00].
- die Vorspannkraftrelaxation mit größeren Auflageflächen unter dem Schraubenkopf abnimmt.
- mit zunehmender Einschraublänge die Vorspannkraftrelaxation abnimmt. Dies wurde bei PA-GF30 erst bei höheren Temperaturen ($T = 80\text{ °C}$) ersichtlich [Tom00].
- die Relaxationsgeschwindigkeit (Abfall des Kurvenverlaufes) abhängig vom Bauteilwerkstoff ist.

Die Zugabe von Feststoffpartikel beispielsweise in Form von 15 Gew.-% - 50 Gew.-% Glasfasern reduzierte in PP und PA die Vorspannkraftrelaxation, insbesondere bei hohen Einsatztemperaturen [Mue99, Dra99, Tom00]. Gleichzeitig spiegelt sich ein steigender Faseranteil in faserverstärkten Kunststoffen in höheren Auszugskräften und Vorspannkraften wider [Dra99]. Maßnahmen um dem Vorspannkraftabfall entgegenzuwirken sind große Flächen zur Lastübertragung im Bereich der Schraubenflanken und unter dem Schraubenkopf, das Nachziehen der Verbindung nach 10 Minuten [Tom00] bis einer Stunde [Ehr07], das Anziehen der Schraube mit geringer Schraubendrehzahl sowie das Mitverschrauben eines Federpakets unter dem Schraubenkopf [Tom00].

Fazit

Die Auswertung des Kenntnisstandes zu Kunststoff-Direktverschraubungen zeigt, dass das Fügeverfahren für die breite Menge an Kunststofftypen ein nahezu lückenlos erforschtes und beherrschbares Fügeverfahren ist. Für Anwender und Konstrukteure sind der Montageprozess und die konstruktiven Auslegungsempfehlungen in der DVS 2241-1 sowie in Produktbeschreibungen der Schraubenhersteller geregelt. Es gilt zu beachten, dass der Montageprozess und die konstruktive Verbindungsgestaltung an kunststofftechnische Anwendungen und deren Belastungen angepasst sind. Das sind vorrangig dünnwandige Bauteile als Gehäuseabdeckungen in der Elektronik- und Automobilindustrie. Die Beanspruchung der Kunststoff-Direktverschraubungen erfolgt vorrangig parallel zur Schraubachse (Herausziehen). Die Bauteile werden so konstruiert, dass Querkräfte nicht in die Verbindungsstelle fließen, sondern konstruktiv abgeleitet werden. Aus diesem Grund müssen die Verbindungen nicht mit einer hohen Vorspannkraft beaufschlagt werden. Praxisrelevante Vorspannkraften in Kunststoff-Direktverschraubungen sind auf etwa 2 bis 4 kN beschränkt. Dies wird zusätzlich durch die Tatsache begründet, dass Verbindungen mit höheren Vorspannkraften stärker relaxieren.

Teilweise fällt sogar die Montagevorspannkraft während der Nutzungsdauer unterhalb der geforderten Montagevorspannkraft ab. In diesem Fall hätte eine hohe Vorspannkraft nur hohe Spannungen in der Verbindungsstelle verursacht. Für diesen Belastungsfall wird anstelle einer hohen Vorspannkraft eine hohe axiale Tragfähigkeit fokussiert, die durch die Verankerungsfestigkeit des Gewindes im Bauteilwerkstoff sichergestellt wird.

Die Verbindungsstellen werden so ausgelegt, dass die benötigte Vorspannkraft über die gesamte Nutzungsdauer des Bauteils übertragen wird und dabei die in der Verbindungsstelle auftretenden Spannungen die Werkstofffestigkeit nie überschreitet. Neben der belastungsgerechten Auslegung der Verbindungsstelle werden sie im Sinne der Material-, Kosten- und Zykluszeiteinsparung wirtschaftlich optimiert. Für die konstruktive Ausführung der Verbindungsstelle bedeutet das minimale Einschraublängen, geringe Wandstärken, minimale Tubusaußendurchmesser und hohe Montagedrehzahlen.

Insbesondere die Kenntnisse zum Fügeprozess und der Optimierungskriterien

- geringes Eindrehmoment M_E
- hohes Überdrehmomente M_U
- große Momentendifferenz dM
- hohe maximal übertragbare Vorspannkraft beim Überdrehen der Verbindung F_{vmax}

zur Untersuchung der konstruktiven Parameter (Schraubengeometrie, Kernlochdurchmesser d_K , Einschraublänge l_E , Bauteildicke t) sind auf die in dieser Arbeit formulierte Problemstellung übertragbar.

2.7.5 Steckschraube-Quergewindebolzenverbindung

Einsatzbereich und Beanspruchung

Quergewindebolzen (QGB) sind etablierte Verbindungsmittel für Eckschraubverbindungen in massiven Konstruktionen des Holzmöbelbaus. Sie kommen zum Einsatz, wenn hohe Anforderungen an Remontage, Festigkeit und Verlässlichkeit an die Verbindung gestellt werden [Erd03]. Die Verbindung besteht aus einer metrischen Schraube und einem zylindrischen Bolzen mit metrischem Anschlussgewinde (Bild 2.19). Die Gewindebohrung im QGB liegt senkrecht zur Mantelfläche. Die Verbindungsmittel sind in unterschiedlichen Gewindegrößen, Außendurchmessern und Längen handelsüblich erhältlich [Ram16].

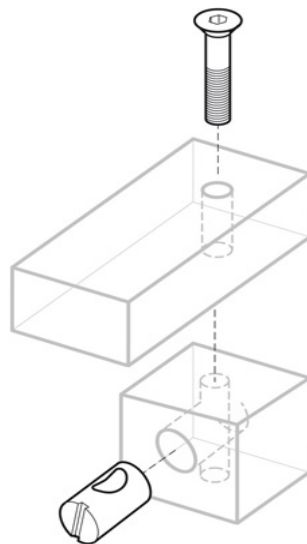


Bild 2.19: QGB-Steckschraubverbindung [Ram16]

Das Kraftübertragungsprinzip und die resultierende Werkstoffbeanspruchung von Schraubverbindungen mit Quergewindebolzen ähneln denen der vorgespannten Durchsteckschraubverbindung (DSV). Der QGB wird in eine senkrecht zur Schraube liegende Bohrung eingefügt. Er übernimmt als verborgenes metallisches Zusatzelement im Bauteil die Funktion einer Mutter (Rundmutter). Zwischen Bolzen und Bauteil liegt ein Formschluss vor, der dafür sorgt, dass beim Festziehen der Schraube kein Kontern auf der Gegenseite der Schraube notwendig ist.

Beim Festziehen dieser Schraubverbindung wirken wie bei Durchsteckschraubverbindungen, Zugkräfte in der Schraube und Druckkräfte auf das Bauteil. Die Besonderheit liegt in der Werkstoffbeanspruchung des Bauteils in dem der Quergewindebolzen sitzt. Durch die Zylindergeometrie des QGB und der wirkenden Druckkraft wird eine Lochleibungsbeanspruchung auf den Bauteilwerkstoff initiiert. Die Lochleibungsfestigkeit ist neben den geometrischen Einflüssen (Bolzendurchmesser, Bauteildicke und Randabstände) von der Druckfestigkeit des Bauteilwerkstoffes abhängig.

Verbindungseigenschaften

Erste Untersuchungen zur Auszugsfestigkeit von Quergewindebolzen aus Sperrholz gehen auf *ERDIL* und *ECKELMANN* zurück [Erd03]. Einen Direktvergleich verschiedener lösbarer Verbindungsmittel für Eckstöße in Buchensperrholz lieferte *SIMENOVA* [Sim14]. Sie untersuchte das maximal ertragbare statische Biegemoment der Eckverbindungen aus unterschiedlichen Verbindungsmitteln. Die untersuchten Verbindungsmittel sind a) Steckschraubverbindung mit Quergewindebolzen b) Confirmatschraube $l_E = 50$ mm und 70 mm c) Holzschraube $l_E = 80$ und 90 mm d) Insertverschraubung e) Korpusverbinder Minifix mit Insert und f) Korpusverbinder Minifix direktverschraubt. Im Ergebnis der vergleichenden Untersuchung wird deutlich, dass Eckverbindungen mit Quergewindebolzen die höchste Kraft aufnehmen können. *ECKARDT* führte ebenfalls vergleichende Untersuchungen an Verbindungsmitteln des Holz- und Möbelbaus durch, mit der Motivation diese in der Fördertechnik aus Holzbauweise einzusetzen [Eck10]. Unter dem dynamischen Belastungsregime sowohl senkrecht als auch parallel zur Schraubachse hielten die QGB neben den Varianten mit Einschlagmutter und Inserts über 100.000 Lastwechsel stand. In zweiter Versuchsinstanz überschritt jedoch die Verbindung mit QGB die vom Anwender festgelegte kritische Durchbiegung und wurde für weitere Untersuchungen nicht weiter betrachtet [Eck10].

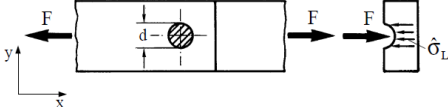
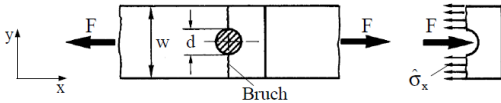
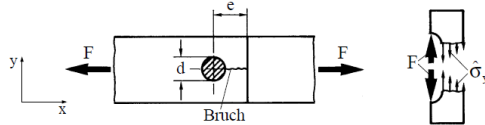
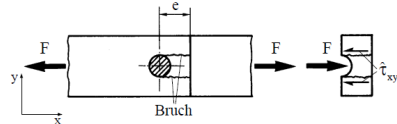
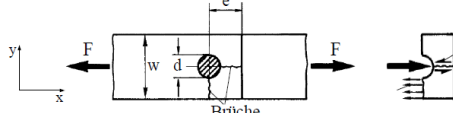
Versagensmechanismen und Dimensionierung

Zur Auslegung von Verbindungen mit Quergewindebolzen liegen weder für Holzwerkstoffe noch für faserverstärkte Kunststoffe separate Bemessungsrichtlinien vor. Da der Quergewindebolzen hauptsächlich im Möbelbau und weniger im Holzbau angewendet wird, ist dieser nicht im Eurocode 5 hinterlegt. Im Möbelbau existieren wenige Untersuchungen zur Auszugsfestigkeit der Quergewindebolzen aus Sperrholz, OSB und Spanplatten, die zur Auslegung der Verbindung für den entsprechenden Werkstoff hinzugezogen werden können [Erd03, Sim14]. Eine allgemeine Bemessungsvorschrift liegt nicht vor. In der Anwendungsnische von Fördertechnik in Holzbauweise hat es sich etabliert, die Verbindungen mit QGB als klassische Bolzenverbindung unter rechtwinkliger Beanspruchung zur Bolzenachse nach Eurocode 5 zu dimensionieren. Mit dieser Bemessungsrichtlinie wird ausschließlich gegen Lochleibungsversagen dimensioniert. Die Mindest- und Randabstände von Bolzen- und Stabdübelverbindungen sind in Abhängigkeit der Bolzenlage zur Faserrichtung und des Bolzendurchmessers im Eurocode 5 festgelegt. Beispielsweise sollte für Stabdübel der Randabstand rechtwinklig zur Faserrichtung $3 d$ betragen für Bolzen $4 d$ [DIN 1995].

Für Bolzenverbindungen in faserverstärkten Kunststoffen liegen Bemessungsrichtlinien für überlappende Scherverbindungen vor [VDI2014-3, Ehr04, Sch07]. Aufgrund des komplexen Spannungszustandes in Bolzenverbindungen werden zur überschlagsmäßigen Berechnung Dimensionierungsformeln nach VDI-Richtlinie 2014 Blatt 3 angewendet. In Abhängigkeit des Bolzendurchmessers D_1 , der Bauteildicke t , der Rand-

abstände w und der Eindringtiefe e treten die Versagensarten Lochleibung, Flanken-
zugbruch im Restquerschnitt, Scherbruch, Spaltbruch und kombinierter Spalt- und
Flanken-
zugbruch in der Fugestelle auf [VDI2014,Ehr04, Sch07] (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Versagensmechanismen von Bolzenverbindungen nach [Sch07]

Versagensart	Dimensionierung	Bezeichnung
Lochleibung	 $F = \sigma_L \cdot D_1 \cdot t \quad (12)$	$D_1 = d =$ Bolzendurchmesser $t =$ Bauteildicke $w =$ Bauteilbreite
Flanken- zugbruch	 $F = \sigma_x \cdot (w - D_1 \cdot t) \quad (13)$	$e =$ Eindringtiefe $\sigma_L =$ Lochleibungs- festigkeit $\sigma_x =$ Zugfestigkeit x
Spaltbruch	 $F = \sigma_y \cdot \left(e - \frac{D_1}{2}\right) \cdot t \quad (14)$	$\sigma_y =$ Zugfestigkeit y $\tau_{xy} =$ Scherfestigkeit
Scherbruch	 $F = \tau_{xy} \cdot 2et \quad (15)$	
Kombinierter Scher- Flanken- zugbruch	 $F = \sigma_x \frac{1}{2} \cdot (w - D_1) t + \tau_{xy} \cdot \left(e - \frac{D_1}{2}\right) t \quad (16)$	

Die Verbindungen sind konstruktiv so zu gestalten, dass die höchste Belastbarkeit der
Fugestelle erreicht wird. Bolzenverbindungen in faserverstärkten Kunststoffen, deren
Haupteinsatzgebiet die Luft- und Raumfahrt ist, werden so dimensioniert, dass
Lochleibungsversagen eintritt und kein Trennbruch der Fugestelle [Sch07]. Damit ist
sichergestellt, dass trotz eines Fehlers in der Verbindungsstelle kein Totalausfall des

Bauteils droht und die Funktion dennoch gewährleistet ist. Die empfohlene Eindringtiefe bezogen auf den Bolzendurchmesser liegt bei $e/D_1 = 3$ und das Bauteilbreitenverhältnis bei $w/D_1 = 5$ [Sch07]. Als Faustregel sollte der Bolzendurchmesser der Fügeteildicke entsprechen [Sch07].

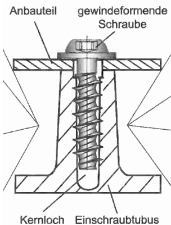
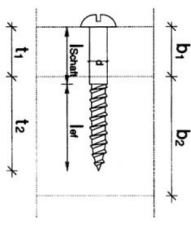
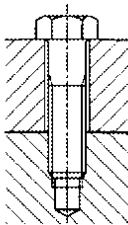
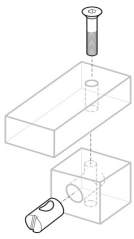
Der Unterschied zu den hier betrachteten Verbindungen mit Quergewindebolzen besteht darin, dass die QGB gegen ein Anbauteil verspannt werden und damit ein Gegendruck auf das Bauteil mit Bolzen erzeugen, welches direkten Einfluss auf das Spannungsverhältnis im Bereich des Bolzens nimmt. Eine freie Strukturkante wie in [Ehr04, S. 667] benannt, liegt nur dann im Betriebszustand vor, wenn die Betriebskraft die Vorspannkraft in der Verbindung übersteigt und eine klaffende Trennfuge beider Bauteile besteht. In diesem Fall liegt bereits das Versagen der Verbindung für maschinenbautechnische Anwendungen vor. Ob die Schadensmechanismen klassischer Überlappverbindungen auch bei QGB-Verbindungen in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie eintreten, ist zudem fraglich. Beispielsweise muss die Querschnittsminderung entlang der Schraubachse berücksichtigt werden.

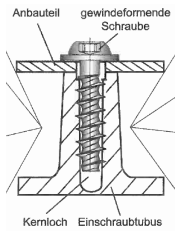
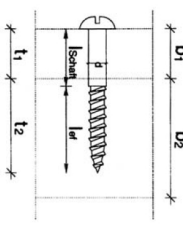
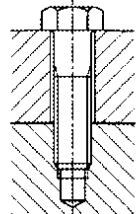
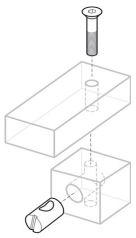
Aufgrund der hohen Druckfestigkeit von hochgefülltem WPC sind hohe Verbindungsfestigkeiten der QGB-Steckschraubverbindung zu erwarten. Erste Untersuchungen zu QGB-Steckschraubverbindungen in einem WPC-Hohlprofil wurden in [Sch17] erarbeitet. Darin konnte die Schraubenauszugskraft durch den Austausch der Schraubinserts durch Quergewindebolzen um mehr als das Doppelte gesteigert werden [Sch17].

2.7.6 Vergleich der Einschraubverbindungen

In diesem Unterkapitel werden die zuvor beschriebenen Einschraubverbindungen miteinander verglichen, um für den Anwendungsfall die Einschraubverbindungsart zu konkretisieren und branchenübergreifende Festlegungen für das experimentelle Vorgehen zu treffen. Bei den in Tabelle 2.6 unterstrichenen Merkmalen handelt es sich um Festlegungen für die in dieser Arbeit untersuchten Einschraubverbindungen.

Tabelle 2.6: Vergleich der Einschraubverbindungen aus dem Stand der Technik

Verbindung	Direkt- verschraubung	Holzschraub- verbindung	Sackloch- verschraubung	QGB- Steckschraub- verbindung
				
Zusatzelement	Ohne			mit
Anwendung	3D-Formteile flächige Bauteile	Holzbau (Träger) Möbelbau	Maschinenbau	Möbelbau
Prinzip der Verschraubung	Formschluss +++ Kraftschluss++	Formschluss+++ Kraftschluss +	Kraftschluss	Formschluss + Kraftschluss +++
Gewinde	spezifisch	DIN 7998	metrisches ISO Regelgewinde DIN 13-1	
Anordnung	<u>Einzelschrauben</u>	Mehrschrauben	Einzel- und Mehrschrauben	k. A.
Fügeteil- werkstoff	<u>viskoelastisch</u> <u>nachgiebig</u>	<u>viskoelastisch</u> <u>nachgiebig</u>	elastisch gering nachgiebig	viskoelastisch nachgiebig
Fügeteil- geometrie	dünnwandig < 4 mm	<u>massiv</u>		<u>massiv</u> Hohlprofile
Einschraubstelle	Einschraubtubus $l_{\text{Emax}} = \text{Tubushöhe}$	<u>vorgebohrte</u> <u>Einschraubstelle im</u> <u>Bauteil</u> $l_{\text{Emax}} = \text{Bauteildicke}$	genormt nach DIN 13-1 bzw. DIN EN 20273	<u>Sack- und</u> <u>Querlochbohrung</u>
Fertigungs- schritte Einschraubstelle	Ausformen während des Urformens	<u>Bohren</u>	Sacklochbohrung Gewindeschneiden	<u>Sacklochbohrung</u> <u>und</u> <u>Querlochbohrung</u>
Fügeprozess	<u>definiert</u>	nicht definiert	definiert	nicht definiert
Vorspannung	gering vorgespannt 2 – 4 kN	i.d.R. nicht vorgespannt	<u>vorgespannt nach</u> <u>VDI 2230</u> (M6: 3,3 kN - 15 kN)	k. A.
Beanspruchung/ Belastung	Herausziehen (Abscheren)	Herausziehen Abscheren	<u>Betriebskräfte</u>	<u>Herausziehen</u> <u>Lochleibung</u>
Belastungsrichtung	Kraft vorrangig parallel zur Schraubachse	Kraft parallel und senkrecht zur Schraubachse		

Verbindung	Direkt- verschraubung	Holzschraub- verbindung	Sackloch- verschraubung	QGB- Steckschraub- verbindung
				
Versagen	<u>Schraubenauszug</u> <u>Schraubenbruch</u> Tubusabriss <u>Tubusspalt</u>	<u>Schraubenauszug</u> <u>Schraubenbruch</u> <u>Spaltbruch</u> Kopfdurchzug	Schraubenbruch Gewindeabscheren und -umformung Kraterausbruch	k. A.
Dimensionierung	<u>DVS 2241</u>	DIN 1052 Eurocode 5	<u>VDI 2230</u> <u>Dimensionierung der</u> <u>Einschraublänge,</u> <u>dass</u> <u>Schraubenbruch</u> <u>eintritt</u>	k. A.
Wiederholmontage	<u>begrenzt</u>	begrenzt	ja	ja

2.8 Einschraubverbindungen in WPC

Untersuchungen, die sich mit Einschraubverbindungen in WPC und NFK beschäftigen, wurden in den letzten 15 Jahren mit zunehmendem Aufkommen der Werkstoffgruppe durchgeführt. Der Großteil dieser Veröffentlichungen behandelt den Schraubenauszugswiderstand diverser gewindeformender bzw. -schneidender Schrauben aus dem Werkstoff NFK/ WPC unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren [Fal01, Cho02, Kuc07, Kho08, Goz08, Cha08, Mad09, Guo10, Ayr10, Haf11a, Goz11, Val11]. Haupteinflussgrößen auf den Schraubenauszugswiderstand sind dabei die Rezepturbestandteile und deren Anteile, die Anwesenheit des Haftvermittlers und des Polymertyps. In den benannten Veröffentlichungen werden NFK-Rezepturen mit unterschiedlichen Anteilen an Holzmehl, Reisstroh, Gummibaumfasern, Holzfasern aus recycelten MDF- und Spanplatten sowie anteilig recycelten Glasfasern hergestellt. Es wurden sowohl geringere Faseranteile 20 - 40% im Spritzgussprozess [Koc07, Goz11] als auch höhere Faseranteile zwischen 60 - 80% im Pressen [Cha08, Fal01, Mad09] abgebildet. In allen benannten Veröffentlichungen wurden die Schraubenauszugsversuche an Plattenmaterial und nicht wie für Kunststoff-Direktverschraubungen üblich, am Einschraubtubus vorgenommen. Hinsichtlich des Einflusses des Naturfaseranteils auf den Schraubenauszugswiderstand liegen widersprüchliche Aussagen vor. FALK untersuchte den Schraubenauszugswiderstand an konventionellen Holzwerkstoffen und gepressten WPC-Proben auf

Basis des Polymergemisches PP/PE-LD mit Holzfaseranteilen von 20 - 60 % [Fal01]. Dabei stellte er fest, dass der Schraubenauszugswiderstand relativ unabhängig vom Faseranteil ist, aber in WPC höhere Schraubenauszugskräfte erreicht werden, als in den Holzwerkstoffen (PB, OSB, PLY, Hb, MDF). Als Erklärung bringt er die Vermutung an, dass die Schraube durch die Anwesenheit der thermoplastischen Matrix homogener umschlossen ist und damit eine gleichmäßigere Kraftübertragung stattfindet [Fal01]. *KOCISZEWSKI* untersuchte den Schraubenauszugswiderstand an 20 - 40 % holzgefüllten Spritzgussproben und konnte keine Korrelation mit dem Faseranteil feststellen [Koc07]. Demgegenüber stellten [Cho08, Ayr10, Mad09, Val11, Goz08] den Zusammenhang fest, dass der Schraubenauszugswiderstand mit steigendem Faseranteil im Compound sinkt. Die Charakterisierung des hergestellten NFK hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften Faserverteilung, Faseragglomerate, Faser-Matrix-Haftung wird nicht durchgeführt. Daher ist unklar in welchem qualitativen Zustand sich das Versuchsmaterial befindet. Beispielsweise wurde in [Cha08] kein Haftvermittler verwendet, der die optimale Anbindung von polarer Naturfaser an unpolare thermoplastische Matrix in naturfaserverstärkten Kunststoffen sicherstellt. Bei WPC ohne Haftvermittler sinkt die Zugfestigkeit mit steigendem Faseranteil [Bas05, Kar07]. Dementsprechend sinken auch die Schraubenauszugskräfte mit steigendem Faseranteil bei den auf Zug beanspruchten Einschraubverbindungen, wenn kein Haftvermittler die Kraftübertragung im Compound sicherstellt. Die in den benannten Veröffentlichungen formulierte Aussage zum Faseranteil widerspricht zudem den Kenntnissen „zur Verbindungstechnik von glasfaserverstärktem Polyamid“ [Dra99]. *DRATSCHMIDT* untersuchte unter anderem den Einfluss des Glasfaseranteils im Polyamid auf die Schraubenauszugsfestigkeit und stellte fest, dass die Auszugskraft mit steigendem Faseranteil deutlich zunimmt [Dra99]. *LÜDTKE* hat sich in seiner Dissertation mit der Herstellung von Leichtbauplatten aus polymerbasiertem holzgefülltem Kern beschäftigt und führte unter anderem Tests zum Schraubenauszugswiderstand durch [Lue11]. Er stellte den Anstieg des Schraubenauszugswiderstandes mit steigendem Holzanteil im geschäumten Polymer-Holz-Kern fest. Diese Untersuchung untermauern die kunststofftechnischen Zusammenhänge am Beispiel eines holzgefüllten Kunststoffes. Eine grundlegende Aussage zur positiven Wirkung des Haftvermittlers im Compound diskutiert [Mad09] in Bezug auf die Schraubenauszugsfestigkeit an. Der Einfluss der Holzfasergröße im Compound auf den Schraubenauszugswiderstand wurde von [Goz11] und [Cha08] dargestellt. Im Ergebnis stellten beide widersprüchliche Kausalketten hinsichtlich der Fasergeometrie auf [Goz11, Cha08].

Der Einfluss der Einschraubrichtung auf den Schraubenauszugswiderstand ist in [Goz08, Goz11, Cho02 und Haf11] untersucht worden. Sie unterschieden in ihren Untersuchungen in Front- und Schmalseite. Wobei die Frontseite senkrecht der Verarbeitungsrichtung und die Schmalseite parallel der Verarbeitungsrichtung definiert ist. *GOZDECKI* stellte nur geringe Unterschiede im Auszugsverhalten in Abhängigkeit der Einschraubrichtung fest

[Goz11]. Die Ergebnisse in [Cho02, Haf11, Goz08] zeigen eine höhere Auszugsfestigkeit aus der Frontseite, entsprechend senkrecht zur Verarbeitungsrichtung auf. *HAFTKHANI* hat sich mit der Untersuchung konstruktiver Einflussparameter (Schraubengeometrie, Kernlochdurchmesser und Einschraublänge) an WPC-Einschraubverbindungen beschäftigt. Von den untersuchten Schraubentypen Schnellbauschraube, Blechschraube und Holzschraube erreichten Einschraubverbindungen mit Holzschrauben in WPC-Paneelen den höchsten Auszugswiderstand [Haff11]. Des Weiteren variierte er den Vorbohrdurchmesser zwischen 2 mm und 3,5 mm und stellte fest, dass der Auszugswiderstand mit zunehmendem Vorbohrdurchmesser ansteigt bis er im Bereich des Schraubennennendurchmesser ($d_1 = 4$ mm) drastisch abfällt [Haff11]. *KHOO* untersuchte den Rand- und Schraubenabstand von Schrauben in WPC-Profilen für ausgewählte Schraubendurchmesser. Für Schrauben mit einem Durchmesser von 8 mm stellt er Risse beim Eindrehen der Schraube ab einem Randabstand kleiner als 8 mm fest [Kho08]. Zusatzuntersuchungen sind an dieser Stelle vom Autor empfohlen worden. Nahezu jeder WPC-Terrassendeckhersteller bietet eine auf sein Produkt spezifisch angepasste Verbindungstechnik an, deren Montage in firmenspezifischen Montageanleitungen geregelt ist. Eingesetzt werden die unterschiedlichsten Schraubengeometrien. Beispielsweise empfiehlt die Firma NOVO-TECH metrische Schrauben zum Anschrauben der WPC-Bohlen. WPC-Itemprofile werden mit Spezialschrauben für Thermoplaste verschraubt. Weitere Hersteller verwenden Spax-Holzschrauben mit / ohne Bohrspitzen. Über das zwingende Vorbohren der Profile sind sich ein Großteil der WPC-Hersteller einig [Fan15, Kos14, Nov15, Reh14]. Zur Schraubmontage selbst geben die Hersteller nur allgemeine Aussagen wie z. B. „das Überdrehen der Schraube ist zu vermeiden“ [Wer14]. Die Firma Rehau gibt in ihrer Montageanleitung das maximal zulässige Anzugdrehmoment von 1,1 Nm an [Reh14].

Die Wirkung äußerer Einflussgrößen auf den Schraubenauszugswiderstand untersuchten *MADHOUSHI*, *GOZDECKI* und *GUO* [Mad09, Goz08, Guo10]. Es wurde festgestellt, dass die Auszugsfestigkeit mit steigendem Wasseranteil abnimmt [Mad09]. Die Materialalterung in der Kombinationsbeanspruchung aus Wasserlagerung, Gefrieren und Aufheizen hatte keinen negativen Einfluss auf die Auszugsfestigkeit der Schrauben aus dem WPC-Material [Goz08]. *GUO* untersuchte den Einfluss der UV-Global-Bewitterung auf die Schraubenauszugsfestigkeit von WPC [Guo10]. Die durch die Bewitterung entstandenen Materialschäden traten entlang der Einschraubstelle in Erscheinung und minderten die Schraubenauszugsfestigkeit um 15% [Guo10].

Untersuchungen an Einschraubverbindungen in WPC mit verspanntem Gegenbauteil liegen derzeit nicht vor bzw. wurden in eigenen Untersuchungen angearbeitet [Sch18]. Die Untersuchungen von *HAFTKHANI* und *MOHAMEDZADEH* bilden die Tragfähigkeit von einschnittigen Verbindungen senkrecht zur Schraubachse, entsprechend unter Scherlochleibungsbeanspruchung ab [Haf11a, Moh12]. Eine Vorspannung der Verbindung erfolgte hier nicht.

Die wissenschaftlichen Untersuchungen zu Einschraubverbindungen in WPC und die Montageanleitungen der WPC-Terrassendielenhersteller beziehen sich ausnahmslos auf Untersuchungen zur statischen Tragfähigkeit im unverspannten Zustand. Kenntnisse zur dynamischen Tragfähigkeit und der Vorspannkraftrelaxation der Verbindungen fehlen bzw. wurden in eigenen Untersuchungen in [Sch17a, Sch17, Sch18a] angearbeitet. Dieses Wissen ist für die WPC-Bauteilanzwendung als Gestellsegmente in der Fördertechnik von elementarer Bedeutung, um Betriebskräfte in den Verbindungsstellen sicher übertragen zu können.

3 Problem- und Zielstellung

Der Anwendungsfall von Gestellsystemen aus Holzwerkstoffhalbzeugen in der Fördertechnik verlangt im Gegensatz zum Möbel- und Holzbaubereich Einschraubverbindungen, die neben statischen Auszugskräften überlagerte Betriebskräfte und -momente, insbesondere Querkräfte, aufnehmen. Hierfür sind vorgespannte Einschraubverbindungen notwendig, dessen Funktionsfähigkeit nur sichergestellt ist, wenn die wirkenden Betriebskräfte die Klemmkraft in der Trennfuge nicht überschreiten. Sobald die Montagevorspannkraft durch Vorspannkraftrelaxation sowie Klemmkraftverluste infolge der angreifenden Zugbetriebskraft die Klemmkraft unterschreitet, tritt der Schadensfall mit dem Klaffen der Verbindung ein. Aus diesem Grund müssen vorgespannte Einschraubverbindungen in WPC unter Berücksichtigung der Relaxationsneigung des viskoelastischen Materials über die notwendige Betriebsdauer nach der Vorspannkraft ausgelegt sein.

Aufgrund der Tatsache, dass bereits während des Aufbringens der Montagevorspannkraft die Verbindungsstelle versagen kann, müssen Montagevorschriften geschaffen werden, die das Versagen im Montagefall vermeiden und den sicheren Einsatz im Betriebszustand gewährleisten. Dabei kann nicht auf die bekannten Auslegungsempfehlungen von Holzwerkstoffen zurückgegriffen werden, da Holzschraubverbindungen für Anwendungen im Holz- und Möbelbau nicht definiert vorgespannt werden müssen.

Als Einschraubverbindungen werden in dieser Arbeit die Einschraubverbindung mit gewindeformender Schraube (Direktverschraubung) und die Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung favorisiert. Die Direktverschraubung bietet sich aufgrund ihres geringen Fertigungsaufwandes und geringer Verbindungsmittelzahl als wirtschaftliches Fügeverfahren an. Die QGB-Steckschraubverbindung ermöglicht mittels des Querbolzens als Zusatzelement den Einbau in Strukturhohlprofilen und die Wiederholmontage der Schraubverbindung.

Die Arbeiten aus dem Stand der Technik zu Einschraubverbindungen in WPC zeigten hauptsächlich rezepturseitige und herstellungsspezifische Einflüsse auf, die jedoch für die konkrete Montage und Dimensionierung einer Schraubverbindung für den benannten Anwendungsfall eine untergeordnete Rolle einnehmen. Die Untersuchungen zu Einschraubverbindungen in WPC beschränken sich auf Schraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben für vorrangig Holzwerkstoffe. Dabei bleibt der gesamte Montageprozess mit seinen charakteristischen Kenngrößen Vorspannkraft, Anzugmoment, Eindreh- und Überdrehmoment für das gezielte Verspannen der Schraubverbindung unbeachtet. Die Untersuchung des Einflusses einzelner Konstruktionsparameter auf die Tragfähigkeit der Verbindung beschränkt sich auf die Einschraublänge und den Kernlochdurchmesser. Zur Beurteilung der Verbindungseigenschaften wurde ausnahmslos die statische Verankerungsfestigkeit in Abhängigkeit verschiedener werk-

stoffseitiger und konstruktiver Einflüsse getestet. Statische Langzeitversuche, die die Vorspannkraftrelaxation der Verbindung infolge des viskoelastischen Verformungsverhaltens abbilden, bleiben bisweilen unbeachtet, sind aber für die genannte Anwendung von elementarer Bedeutung.

Es ist nochmals hervorzuheben, dass die bisherigen Untersuchungen an verschiedenartig urgeformten WPCs durchgeführt worden sind, dessen Ergebnisse untereinander nicht vergleichbar sind. So ist es zum Beispiel nur bedingt möglich, Aussagen von an Spritzgussbauteilen (mit Füllgraden bis max. 50%) durchgeführten Versuchen auf hochgefüllte Extrusionsbauteile (Füllgrade bis 75%) zu übertragen. Das hat zur Folge, dass nur material- und herstellungsspezifische Kenntnisse gewonnen wurden, die sich teilweise untereinander widerlegen. Diese Kenntnisse zum Stand der Technik von Einschraubverbindungen in WPC sind nicht ausreichend, um eine sichere Montage und hohe Tragfähigkeit im Betriebszustand von vorgespannten Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben sicherzustellen.

Die Anwendbarkeit von QGB-Steckschraubverbindungen in WPC wurde mit Ausnahme der Montage eines WPC-Systemhohlprofiles noch nicht in Betracht gezogen. Für die Auslegung der QGB-Steckschraubverbindung kann möglicherweise auf die Kenntnisse von Bolzenverbindungen in faserverstärkten Kunststoffen und Holzwerkstoffe zurückgegriffen werden. Inwiefern die Zusammenhänge von Bolzenverbindungen auf vorgespannte QGB-Steckschraubverbindungen in hochgefüllte, extrudierte Holz-Polymer-Werkstoffe übertragbar sind, ist noch fraglich.

Aufgrund fehlender Kenntnisse zum Montageprozess von Einschraubverbindungen in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen und der fraglichen Übertragbarkeit der Montage Richtlinien aus der Kunststoffbranche ist die Durchführung eigener experimenteller Untersuchungen notwendig. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die werkstoffspezifischen und konstruktiven Einflussfaktoren von extrudierten, hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen auf den Montageprozess und die Tragfähigkeit von vorgespannten Einschraubverbindungen mit gewindeformenden Schrauben und Quergewindebolzen zu erarbeiten. Dabei werden der Montageprozess für Direktverschraubung aus der Kunststofffügetechnik und ausgewählte Vorspannkraftrelaxationsversuche im Fokus stehen. Das Zielkriterium für die Montageoptimierung beider Verbindungsarten wird sein, die größtmögliche Lastausnutzung der Schraube zu erreichen und die Vorspannkraft über die Beanspruchungszeit so lang wie möglich aufrecht zu erhalten. Mittels der generierten Ergebnisse sollen Anwendern Montagehinweise empfohlen werden, mit denen eine sichere Gebrauchstauglichkeit und hohe mechanische Belastbarkeit von vorgespannten Einschraubverbindungen in Holz-Polymer-Werkstoffen realisierbar sind. Ferner ermöglichen die ermittelten technischen Grenzen der Einschraubverbindungen für extrudierte, hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe die Neudimensionierung bestehender Anlagen und tragen letztendlich für weitere Anwendungen im Umfeld der technischen Intralogistik bei.

4 Versuchsprogramm

Für die Anwendung von vorgespannten Einschraubverbindungen in WPC ist es nötig, Aussagen zur Schraubmontage und der Vorspannkraftrelaxation zu treffen. Beide Schwerpunkte werden in dieser Arbeit untersucht. Als wirtschaftlich relevante Einschraubverbindungen stehen die Direktverschraubung und die QGB-Steckschraubverbindung für die Wiederholmontage im Fokus. Die Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf einschnittige Schraubverbindungen, die als Einfachverschraubungen ausgeführt sind. Die Schraubverbindung wird gemäß ihrer Vorzugsbelastungsrichtung parallel zur Schraubachse beansprucht.

Aufgrund ihrer technischen Leistungsfähigkeit und Praxisrelevanz für die Green-LogisticPlant (GLP), werden ausschließlich handelsübliche Holz-Polymer-Werkstoffe in die Untersuchung eingebunden. Um hierbei auf qualitativ hochwertige Werkstoffe zurückzugreifen, die die Anforderungen für den Einsatz in der GLP erfüllen, wurde eine vorgelagerte Materialcharakterisierung durchgeführt. Die detaillierte Versuchsbeschreibung, die Beurteilungskriterien zur Materialauswahl sowie die Ergebnisdarstellung ist in [Sch16] dokumentiert und in dieser Arbeit in Kapitel 5.1 zusammengefasst. Die Hauptuntersuchungen werden an dem Holz-Polymer-Werkstoff mit dem höchsten Holzanteil durchgeführt. Dieser kommt bereits in fördertechnischen Anlagen zum Einsatz.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit unterteilen sich in zwei Bereiche, der **Untersuchung des Fügeprozesses** hinsichtlich werkstoffspezifischer, konstruktiver und montage-technischer Einflussfaktoren und des **Anwendungsvergleiches beider Einschraubverbindungen im Betriebszustand**.

Im **Teil 1** werden zunächst grundlegende Einflussfaktoren und Prozessparameter auf den Fügeprozess identifiziert und die daraus resultierenden Verbindungseigenschaften analysiert. Dabei werden insbesondere die werkstofftypischen Eigenschaften aus Anisotropie, Hydrophilie und Viskoelastizität des Werkstoffes in die Prozessparameteruntersuchung eingebunden. Es ist zu beachten, dass sich beide Schraubverbindungen in ihrem Montageprozess und konstruktiven Einflussgrößen unterscheiden und dadurch ein abweichendes experimentelles Vorgehen verlangen. Tabelle 4.1 fasst die auf die Tragfähigkeit einflussnehmenden konstruktiven und montage-technischen Prozessgrößen beider Schraubverbindungen zusammen. Für die Prozessuntersuchung werden die Parameter in einem weiten Bereich variiert und die Wirkung auf die Zielgrößen ausgewertet. Im Fokus dieser Parameteruntersuchung stehen die Montageversuche mit den Zielgrößen Momentendifferenz dM und maximal übertragbare Vorspannkraft F_{vmax} sowie der statische Schraubenauszugsversuch zur Ermittlung der Auszugskraft und des statischen Ausziehparameters f_{ax} . Für alle Zielgrößen gilt ein höherer Wert als technisch besseres Ergebnis. Zusätzlich wird die optische und mikroskopische Schadensbeurteilung der Verbindungsstelle und des Werkstoffes an ausgewählten Proben hinzugezogen.

Tabelle 4.1: Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit der Einschraubverbindungen

Einflussfaktor	Direktverschraubung	QGB- Steckschraubverbindung
konstruktiv	Schraubengeometrie	Bolzendurchmesser
	Kernlochdurchmesser	e/D_1 - Verhältnis
	Einschraublänge	w/D_1 - Verhältnis
	Bauteildicke, Bauteilbreite	Bauteildicke
montagetechnisch	Einschraub- und Anziehdrehzahl	
	Nachziehen	
werkstofftypisch	Anisotropie	
	Hydrophilie	
	Viskoelastizität	

Ferner dient die Parametervariation der Ableitung optimaler Fügeparameter für diese Werkstoffgruppe. Das Zielkriterium für die Parameteroptimierung ist die Maximierung der von der Verbindung übertragbaren Vorspannkraft, indem beispielsweise die tragende Fläche des Verbindungsmittels im Werkstoff erhöht und dabei die Schraubenzugfestigkeit und das Bruchmoment stets berücksichtigt wird. Weitere Beurteilungskriterien werden für die spezielle Einschraubverbindung im jeweiligen Ergebnisteil erarbeitet. Mittels aufbauender, abgegrenzter Versuchsreihen, deren Reihenfolge sich an den praxisüblichen Montageablauf orientieren, wird der Versuchsumfang begrenzt (Tabelle 4.2). Nach jeder Versuchsreihe liegt ein Zwischenergebnis vor, das in der darauffolgenden Versuchsreihe berücksichtigt wird. Es werden folgende Untersuchungsreihen angestrebt:

1. Erarbeitung der möglichen Verbindungsmittel (Schraube, Bolzen)
→ Ergebnis: Bewertung und Auswahl des Verbindungsmittels
2. Erarbeitung konstruktiver Einflussparameter (d_K , l_E , t , e/D_1 , w/D_1 , t_B)
→ Ergebnis: Empfehlung für konstruktive Parameter für die Schraubverbindung
3. Überprüfen der Übertragbarkeit konstruktiver Parameter auf andere Werkstoffe
→ Ergebnis: Werkstoffeinfluss, ggf. Anpassung zu anderen WPC-Werkstoffen
4. Untersuchung des Einflusses der Einschraubrichtung auf die konstruktiven Parameter → Ergebnis: Richtungseinfluss in Abhängigkeit des Werkstoffes, ggf. Anpassung der konstruktiven Parameter
5. Untersuchung des Einflusses der Materialfeuchtigkeit auf die konstruktiven Parameter → Ergebnis: Einfluss der Materialfeuchtigkeit, ggf. Anpassung der konstruktiven Parameter

6. Untersuchung des Einflusses der Montagedrehzahl und des Nachziehens auf die Vorspannkraftrelaxation

→ Ergebnisse: Maßnahmen, um die Vorspannkraftrelaxation zu minimieren

Den detaillierten Versuchsplan zur Untersuchung der Fügeprozesse stellt Tabelle 4.2 dar.

Tabelle 4.2: Versuchsplan für den Versuchsteil 1

Halbzeug		Terrassendiele									Bohle		
Werkstoff		WPC-1			WPC-5			WPC-6			WPC-5		
Richtung*		P SE	S PE	S SE	P SE	S PE	S SE	P SE	S PE	S SE	P SE	S PE	S SE
Versuchsreihe GFS	Schraubentyp	x			x			x					
	Vorbohrung d_k	x			x			x					
	Einschraublänge	(x)	x	x	(x)	x	x	(x)	x	x	x	x	x
	Bauteildicke, Bauteilbreite										x	x	
	Montagedrehzahl				x	x							
	Materialfeuchte				x	x	x						
	Nachziehen + Vorspannkraftrelaxation					x							
Versuchsreihe QGB	e/D ₁ -Verhältnis					x							
	w/D ₁ -Verhältnis					x							
	Bauteildicke											x	
	Einschraubrichtung				(x)	x	x	(x)	x	x			
	Materialfeuchtigkeit					x							
	Nachspannen + Vorspannkraftrelaxation					x							

* Richtungsfestlegung und dessen Erklärung siehe Kapitel 5.2

P-SE Platte, senkrecht zur Extrusion

S-PE Scheibe, parallel zur Extrusion

S-SE Scheibe, senkrecht zur Extrusion

Im **Teil 2** steht der Anwendungsvergleich beider Einschraubverbindungen im Fokus. Die hierfür zugrunde gelegten Versuche sind:

7. Ermittlung der statischen Auszugsfestigkeit an verspannten Einschraubverbindungen
8. Ermittlung der Vorspannkraftrelaxation beider Einschraubverbindungen unter variabler Werkstofffeuchtigkeit

Für den Anwendungsvergleich werden die Einschraubverbindungen mit den im Teil 1 empfohlenen Parametern montiert. Als Vergleichsbasis beider Verbindungsarten werden

gleiche Vorspannkkräfte zugrunde gelegt. In diesem Versuchsteil wird ausschließlich der Werkstoff WPC-5 verwendet. Es wird sich auf die Einschraubrichtung Scheibe parallel zur Extrusionsrichtung beschränkt (S-PE).

Für die Untersuchung der Vorspannkraftrelaxation unter langzeitruhender Beanspruchung wird der Einfluss der Materialfeuchtigkeit und der damit einhergehenden Dimensionsänderung des Materials mit berücksichtigt, da selbst in Produktionsstätten Bauteile aus WPC Klimaschwankungen ausgesetzt sind. In [Mue15] wurden die zu erwartenden Klimaschwankungen in Produktionsstätten über einen Messzeitraum von fast einem Jahr real gemessen und in technisch relevante Kategorien eingeteilt. So treten über die Jahresscheibe folgende Kategorien auf:

- trocken / kalt (Minimalwert) 16,6 °C, 15,3% rel. LF
- mäßig feucht / warm 32,4 °C, 33,9% rel. LF
- nahe Normklima 19,6 °C, 65,6% rel. LF [Mue15]

Geht man von diesen Klimakategorien und den gemessenen Klimadaten in [Mue15, S.64] aus, tritt über die Jahresscheibe eine Luftfeuchtheitsdifferenz von maximal 50% innerhalb der drei Übergangsmonate in Produktionsstätten auf. Mit der Zunahme der relativen Luftfeuchtigkeit geht gleichnamig die Änderung der Materialfeuchtigkeit einher. Aufgrund des im Vergleich zu Vollholz 10-fach langsameren Wassertransportmechanismus in WPC (70% Holz) [Bur11] ist ausschließlich der Klimawechsel von Sommer- auf Winterhalbjahr bzw. Winter- auf Sommerhalbjahr technisch relevant.

Um den Einfluss der Feuchtheitsaufnahme auf den Vorspannkraftverlauf herauszuarbeiten werden über einen Testzeitraum von mindestens drei Monaten die Szenarien

- die Schraubverbindung relaxiert ohne merklich Feuchtheit aufzunehmen und
- die Schraubverbindung relaxiert während sie Feuchtheit aufnimmt

abgebildet. Der Testzeitraum entspricht hierbei den drei Übergangsmonaten der Jahresscheibe.

Aus der Gegenüberstellung der Relaxationskurven aus beiden Szenarien kann der Einfluss der Materialfeuchtigkeit als Faktor abgebildet werden. Über die gesamte Dauer der Relaxationsversuche wird die Vorspannkraft in der Verbindung aufgezeichnet, um direkten Rückschluss auf die Quellneigung des Materials und der Vorspannkraftrelaxation zu nehmen. Hierfür wird ausnahmslos das Material WPC-5 eingesetzt, da aufgrund des höchsten Holzanteils der größte Effekt hinsichtlich der Feuchtheitsaufnahme und Quellneigung zu erwarten ist.

5 Experimentelle Untersuchungen

5.1 Untersuchte Werkstoffe

Für die Verbindungsversuche wurden ausschließlich handelsübliche WPC-Vollprofile einbezogen. Aus der aktuell am Markt vorhandenen Produktpalette wurden die Werkstoffe ausgewählt, die den Anforderungen an eine hohe Werkstoff- und Bauteilqualität nach den Kriterien

- a) prozesssichere Rezepturverarbeitung
- b) geringe Materialfehler
- c) hohe spezifische mechanische Eigenschaften
- d) geringen Eigenschaftsschwankungen über die Bauteilbreite [Sch16] erfüllten und damit für fördertechnische Anlagen in Holzbauweise relevant sind. Zum Einsatz kamen die Halbzeuge Terrassendeck und Konstruktionsbohle. Die Bezeichnung der Versuchswerkstoffe, deren Ausgangsprofilgeometrie und deren Werkstoffkenndaten sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Zur Analyse der eingesetzten Profilhalbzeuge wurden großteils eigene Werkstoffversuche durchgeführt. Die zugrunde gelegten mechanischen Versuche wurden an den Profilhalbzeugen Terrassendiele in den in Tabelle 5.1 angegebenen Prüfrichtungen durchgeführt.

In Bild 5.1 sind für die Werkstoffe WPC-1, WPC-5 und WPC-6 die makroskopische Werkstoffstruktur sowohl senkrecht als auch parallel zur Extrusionsrichtung dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass die in den Grundlagen beschriebene Schichtstruktur nur für den Werkstoff WPC-6 nachgewiesen werden kann. Sie ist gekennzeichnet durch eine Vorzugsorientierung der holzbasierenden Füllstoffe parallel zur Extrusionsrichtung im Außenbereich und einer regellosen bis Querorientierung der holzbasierenden Füllstoffe in der Bauteilmitte, siehe Bild 5.1 rechts. Die Draufsichtaufnahme des Werkstoffes WPC-5 lässt aufgrund der geringen Partikelgrößen nur noch eine tendenzielle Orientierung in Extrusionsrichtung erkennen. Für den Werkstoff WPC-1 hingegen ist keine Orientierung mehr nachweisbar, obwohl die mechanischen Untersuchungen in [Sch16] richtungsabhängige Eigenschaften aufzeigten.

Die grundlegenden Verbindungsversuche wurden am Material WPC-5 durchgeführt, da ein bestehendes Anwendungsbauteil aus diesem Material in einer fördertechnischen Anlage geprüft wird.

Da die hygroskopischen Materialien zur Feuchtigkeitsaufnahme neigen, wurden alle Versuchswerkstoffe und deren Probekörper an einem Ort gelagert und nach den jeweiligen Versuchen die Restfeuchtigkeit nach DIN EN 322 bestimmt. Es ist zu erwähnen, dass am Ort der Probenlagerung das Klima ($20\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$, $30\% \pm 5\%$ rel. LF)

vom Normklima für Holzwerkstoffe (20 °C / 65 % rel. LF) abwich. Das Quellmaß α_Q der Materialien wurde an je 5 Würfelp Proben der Kantenlänge $a = 15$ mm in den Richtungen Dicke, Breite und Länge bestimmt. Die Richtungen wurden ausgehend von der Terrassendiele auf dem Prüfwürfel vermerkt. Zur Probenkonditionierung wurde eine vollständige Kaltwasserlagerung bei annähernd 20 °C über einen Umfang von 28 Tagen durchgeführt. Die Kantenlängen wurden jeweils vor und nach der Auslagerung gemessen und aus den jeweiligen Wertepaaren das Quellmaß in Prozent nach

$$\alpha_Q = \frac{a_2 - a_1}{a_1} \cdot 100 \quad [\text{Nie93}] \quad (17)$$

ermittelt. Die Messung des Feuchtegehaltes H nach DIN EN 322 erfolgte, sofern nicht anders angegeben, an dem gleichen Probentyp wie sie für die Quellmaßbestimmung zur Verfügung stehen.

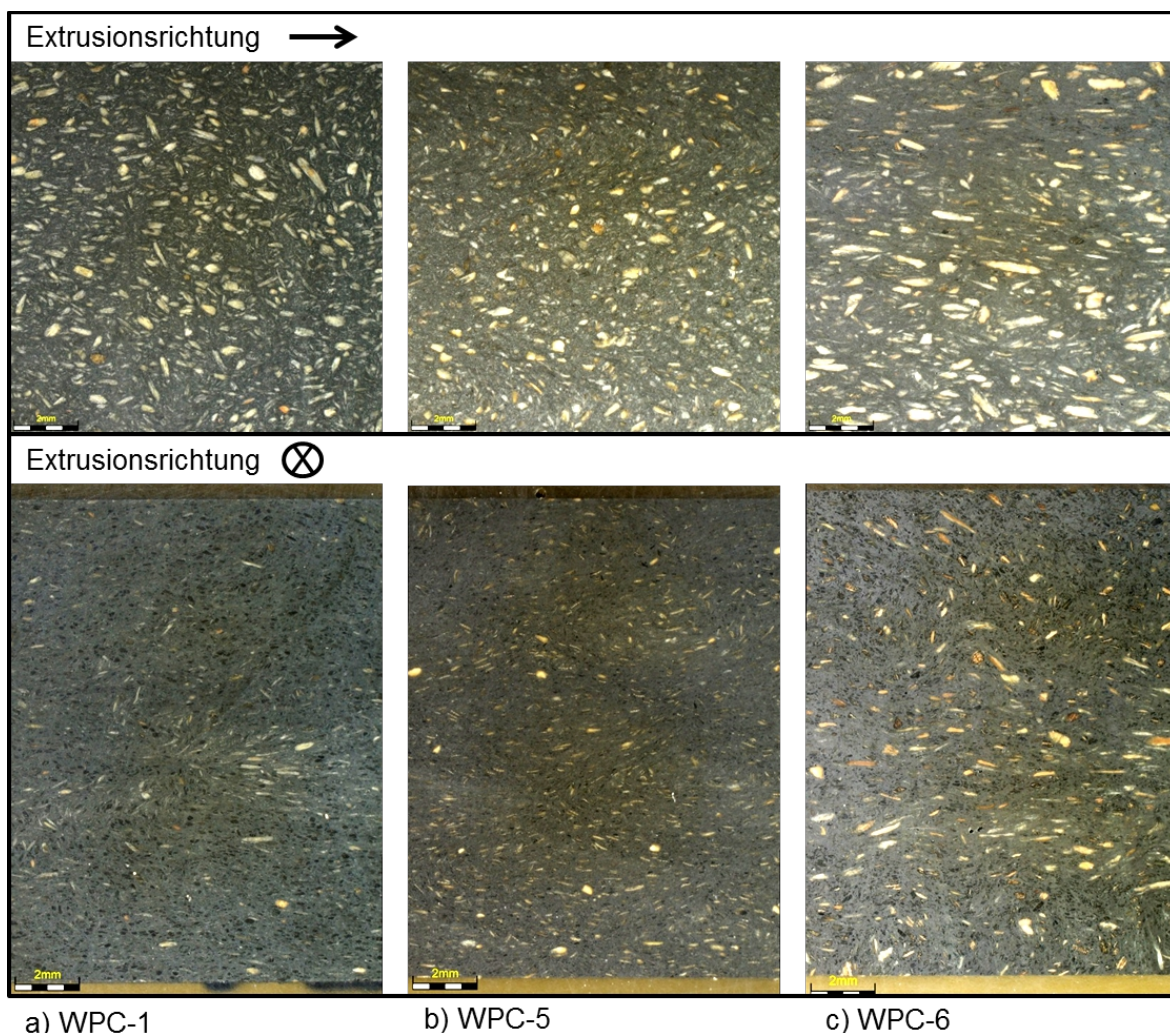


Bild 5.1: Orientierung der holzbasierenden Füllstoffe im Probenmaterial aus dem Halbzeug Terrassendiele in der Draufsichtaufnahme (oben) und in der Querschnittaufnahme (unten), Entnahmestelle jeweils 40 mm von der Außenkante entfernt, Skalierungsbalken entspricht jeweils 2 mm

Tabelle 5.1: Physikalische und mechanische Eigenschaften der untersuchten Holz-Polymer-Werkstoffe (Werte wurden in eigenen Versuchen gemessen, * aus Datenblättern [Wer15, Nov16, Moe13])

Bezeichnung	Einheit	WPC-1	WPC-5	WPC-6
Querschnitt Diele	mm	21 x 15*	21 x 145*	22 x 145*
Querschnitt Konstruktionsbohle			40 x 112*	
Dichte ρ	g/cm ³	1,35* / 1,38	1,2* / 1,25	1,1* / 1,16
Matrixmaterial	-	PVC*	PE-HD*	PP*
Anteil holzbasierender Füllstoff	Gew. %	56*	75*	60*
Schmelztemperatur T_M	°C	$T_G = 79$	$T_M = 129,5$	$T_M = 164$
Glasübergangstemperatur T_G				
Feuchtaufnahme nach Kaltwasserlagerung 28 Tage 20 °C, Würfelprobe a = 15 mm	%	5,16	6,64	7,88
Quellmaß α_Q nach Kaltwasserlagerung 28 Tage 20 °C, Würfelprobe a = 15 mm	D/B/L %	3,3/ 1/ 0,94	4,9/ 2 /1,18	4,4/ 1,6/ 1,6
Dreipunktbiegung DIN EN 310; Prüfrichtung \perp S-PE mit $v = 5 \text{ mm/min}^{(1)}$ und $v = 10 \text{ mm/min}^{(2)}$				
Festigkeit σ_b	MPa	55,25 ¹	56,58 ¹ 67,2 ²	63,82 ¹
E-modul E_b (zwischen 10 – 40% F_{\max})	MPa	7183 ¹	5607 ¹ 6581 ²	5836 ¹
Bruchdehnung ε_b	%	0,9 ¹	1,68 ¹ 1,75 ²	1,85 ¹
Zug DIN EN 527-4 ; Prüfrichtung II S-PE, $v = 10 \text{ mm/min}$				
Zugfestigkeit σ_z	MPa	28,8	38,3	39,4
Zug E-modul E_z (zwischen 10 – 40% F_{\max})	MPa	5509	5551	4969
Bruchdehnung Zug ε_z	%	0,62	1,33	1,5
Druck $v = 10 \text{ mm/min}$; Prüfrichtung II S-PE, Probekörper Würfel a = 15 mm				
Druckfestigkeit bei Bruch σ_D	MPa	76,4	70,2	85,4
Druckmodul K (zwischen 10 – 40% F_{\max})	MPa	3656	4075	4272
Stauchung bei Bruch	%	3,3	4,9	6,5
Lochleibungsfestigkeit DIN EN 383, Prüfrichtung II Richtung S-PE, $v = 1,5 \text{ mm/min}$				
Lochleibungsfestigkeit σ_L	N/mm ²	108,3	103	113,7

5.2 Probekörper

Die bestehende Werkstoffanisotropie verlangt zur eindeutigen Versuchsdurchführung die Festlegung richtungsbezogener Größen. Hierfür wird die Unterscheidung der Belastungsrichtung in „Scheibe“ und „Platte“ aus dem konstruktiven Ingenieurholzbau übernommen [Neu09] und um den Bezugspunkt der Extrusionsrichtung erweitert. Die Extrusionsrichtung bestimmt verfahrenstechnisch den Schmelzefluss und die sich über den Profilquerschnitt einstellende 3D-Partikelorientierung. Daraus resultieren gemäß Bild 5.2 die Richtungen

- Platte, senkrecht zur Extrusionsrichtung (P-SE)
- Scheibe, senkrecht zur Extrusionsrichtung (S-SE)
- Scheibe, parallel zur Extrusionsrichtung (S-PE)

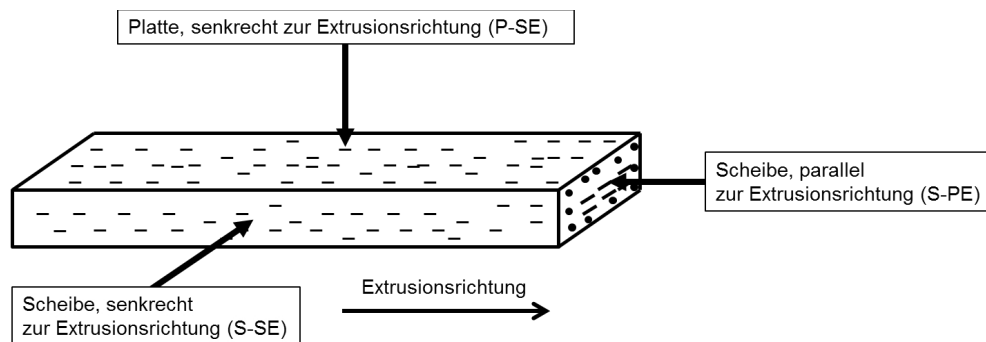


Bild 5.2: Richtungsfestlegung [Sch17a, Sch18a]

Das eingesetzte Profilhalbzeug „Terrassendeck“ wurde aufgrund bestehender Querschnitts- und Oberflächenungleichheiten beidseitig fräsend bearbeitet und auf eine Nenndicke von 15 mm abgerichtet. Für den Werkstoff WPC-5 wurde neben Terrassendielen auch die Konstruktionsbohle für die Versuche hinzugezogen.

Für die jeweiligen Versuche wurden Probekörper aus den überfrästen Halbzeugen geschnitten und gemäß der Probekörpergeometrie in Bild 5.3 und Bild 5.4 für die Einschraubverbindungen gebohrt. Um den Einfluss der konstruktiven Parameter herauszuarbeiten, wurden sie je nach Versuchsreihe variiert. Für die QGB-Steckschraubverbindung sind das die Parameter Bolzendurchmesser D_1 , Eindringtiefe e , Bauteilbreite w und Bauteildicke t . Die Probenlänge L wurde auf $e + 30$ mm festgelegt. Die Stirnlochbohrung D_2 betrug stets 6,5 mm. Für die Direktverschraubungen sind es die Parameter Bauteildicke t , Bauteilbreite B , Probenlänge L , Einschraublänge l_E und Kernlochdurchmesser d_K . Da das Verbindungsmittel stets symmetrisch im Probekörper eingebracht ist, entspricht die Bezeichnung Bauteilbreite w (für ESV-QGB) und B (für ESV-GFS) dem doppelten Randabstand a_3 .

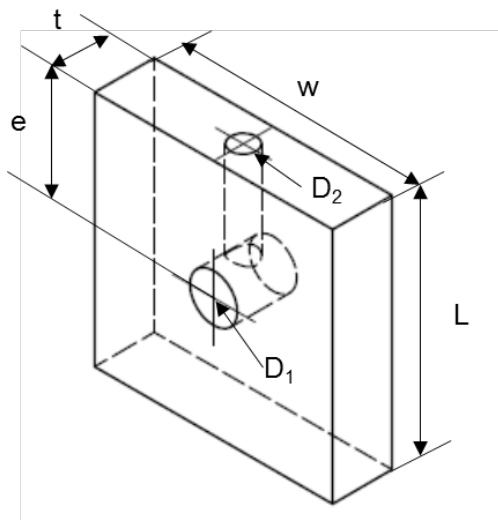


Bild 5.3: Probekörpergeometrie QGB-Steckverschraubungsverbindung (ESV-QGB)

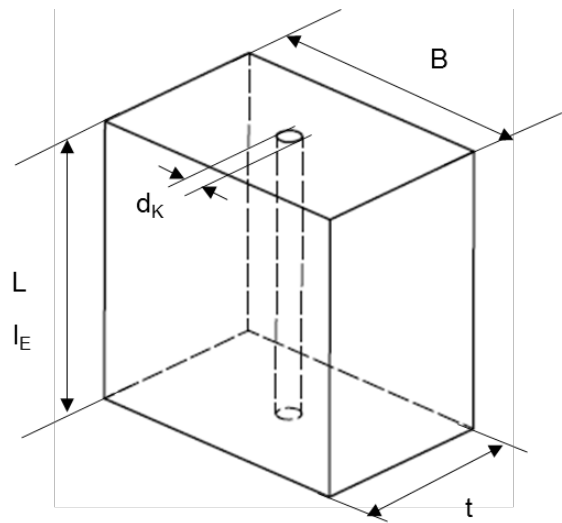


Bild 5.4: Probekörpergeometrie Direktverschraubung (ESV-GFS) [Sch17a, Sch18a]

5.3 Probekörperkonditionierung

Holz-Polymer-Werkstoffe sind aufgrund der geringen Diffusionsgeschwindigkeit durch eine sehr langsame Aufnahme und Abgabe von Wasser charakterisiert. Dadurch bleibt das aufgenommene Wasser über einen langen Zeitraum im Werkstoff gespeichert, welches einer Probenkonditionierung im Kaltwasser nahe kommt. Gleichzeitig würde die Probenkonditionierung bei geringer Luftfeuchtigkeit nur eine geringe Materialfeuchtigkeit von maximal 2% nach sich ziehen, dessen Effekt möglicherweise zu gering ist. Aus Effizienzgründen wird sich für die Untersuchungsreihen zur Materialfeuchtigkeit auf die extremen Methoden des Darrtrocknens und der Kaltwasserlagerung beschränkt. Als Referenzklima wird das Raumklima der Probenlagerung ($20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, $30\% \pm 5\%$ rel. LF) festgelegt. Die Darrtrocknung nach DIN EN 322 erfolgte im Trockenschrank bei 103°C bis zur Massekonstanz und wurde sowohl für die Bestimmung der Restmaterialfeuchte als auch für die Probenkonditionierung durchgeführt.

Die Kaltwasserlagerung wurde in Anlehnung an das Gütesiegel für Holz-Polymer-Werkstoffe durchgeführt. Die Lagerungsdauer umfasste jedoch einen wesentlich längeren Zeitraum von 90 bis 282 Tagen. Die Quellung der Proben wurde nach DIN EN 317 ermittelt.

Für die Versuchsreihe zum Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter wurden die Proben teilweise vor als auch nach der Kaltwasserlagerung gebohrt. Dabei diente die Bohrung vor dem Lagerungsversuch dazu, das Material stärker zu schwächen, sodass das Wasser effektiver in die Einschraubstelle eintreten konnte.

5.4 Verbindungsmittel

Für die Untersuchungen wurden in erster Linie Schraubentypen verwendet, die zum gegenwärtigen Stand der Technik in hochgefüllten WPC-Extrusionsprofilen ihre Anwendung finden. Ausgewählt wurden handelsübliche gewindeformende Schrauben für Thermoplaste und Holzwerkstoffe sowie eine für Duroplaste und Leichtmetalle (Bild 5.5). Die Schraube für Leichtmetalle der Firma Ejot mit der Bezeichnung Altracs® ist kompatibel zu Schrauben mit metrischem Gewinde. Um die Schraubenauswahl ein Stück weit zu vereinheitlichen und eine Vergleichsbasis zu finden, wurde unter Berücksichtigung der Gewindetoleranz auf einen einheitlichen Gewindeaußendurchmesser geachtet. Die geometrischen Maße der jeweiligen Schraube fasst Tabelle 5.2 zusammen. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind der Flankenwinkel, die Flankengestaltung, die Gewindesteigung und der Gewindekerndurchmesser. Die benannten Unterscheidungsmerkmale sind an den jeweils vorgesehenen Werkstoff angepasst. So sind beispielsweise Schrauben für Thermoplaste hinsichtlich Flankenwinkel, Flanken-geometrie, Kernausskehlung und Flankenhöhe so gestaltet, dass geringe Radialspannungen beim Eindrehen entstehen, hohe Kräfte in Axialrichtung übertragen und die Relaxationsneigung durch große Gewindeflächen minimiert werden.

Für die Einschraubverbindung mit gewindeformenden Schrauben wurden alle Schrauben direkt, ohne vorheriges Gewindeschneiden, in die vorgebohrte Verbindungsstelle eingeschraubt.

Für die Quergewindebolzen-Steckschraubverbindungen wurden metrische Maschinenschrauben M6 10.9 mit Gewinde nach DIN 13-1 verwendet. Die eingesetzten Quergewindebolzen mit M6-Anschlussgewinde wurden aus blankgezogenem Rundstahl S235JR der Durchmesser $D_1 = 10 \text{ mm}$, 12 mm , 15 mm und 20 mm und den Längen 15 mm und 30 mm gefertigt. Der QGB mit $D_1 = 12 \text{ mm}$ und $L_B = 16 \text{ mm}$ wurde von der Firma Rampa bezogen. Der Festigkeitsunterschied zwischen Schraube und Quergewindebolzen kann vernachlässigt werden, da die Holz-Polymer-Werkstoffe im Vergleich zu den Verbindungsmitteln eine größere Nachgiebigkeit besitzen und im Schadensfall das Holzwerkstoffversagen zu erwarten ist.

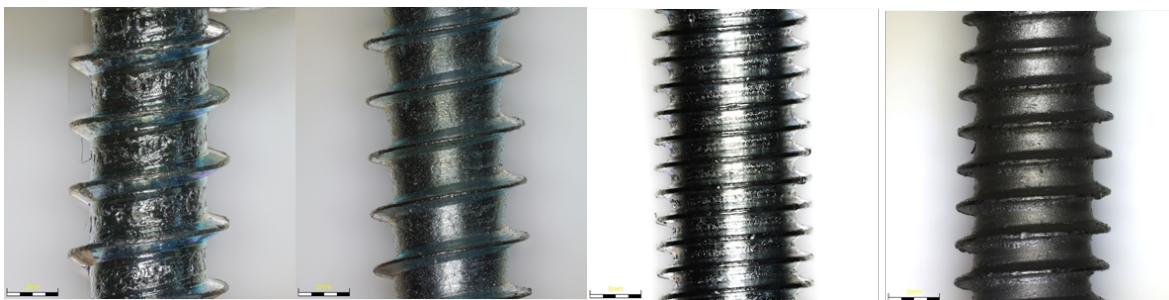


Bild 5.5: Gewindegeometrie untersuchter gewindeformender Schrauben für Holzwerkstoffe, Thermoplaste, Leichtmetalle, Duroplaste (v.l.n.r.)

Tabelle 5.2: *Eingesetzte gewindeformende Schrauben*

Schraube für	Holzwerkstoffe	Thermoplaste	Leichtmetalle	Duroplaste
Bezeichnung	KOKF	STSplus®	Altracs®	SDS®
Hersteller	Fa. Rampa	Fa. Schriever	Fa. EJOT	Fa. Schriever
Besonderheit	Gewindeflan- ken nach DIN 7998	veränderter Flankenwinkel		Gewindeflanken asymmetrisch
Festigkeitsklasse	4.8	10.9	10.9	k. A.
Steigung [mm]	2,6	2,14	1,00	1,4
Gewindenenn- durchmesser d ₁ [mm]	6,3	6	6	6
Gewindeaußen- durchmesser d ₃ [mm]	6,15	6,05	6	6
Gewindekern- durchmesser d ₂ [mm]	4,5	4,26	4,59	4,5
Flankenwinkel	60°	30°	33°	30°
Oberfläche	verzinkt	verzinkt 5-7µm blau passiviert	verzinkt	verzinkt
Verwendete Schraubenlänge [mm]	50	40 50 65 80	50	55
Antrieb	Innensechskant	Innensechsrund Torx	Innensechsrund Torx	Außensechskant
Durchmesser Schraubenkopf [mm]	15	13	12	11,5

5.5 Verbindungsaufbau

Sowohl für die Parameterversuche als auch für die Untersuchung der Verbindungseigenschaften im Betriebszustand wurde eine einschnittige Einschraubenverbindung gemäß Bild 5.6 ausgeführt. Die Testproben sind stets mit einem 5 mm dicken Stahlanbauteil verschraubt. Dieses ist mit einer Durchgangsbohrung $d = 7,5 \text{ mm}$ versehen. Die Breite des Anbauteils lehnte sich an die Probenbreite an, sodass die Kontaktfläche zwischen Anbauteil und Probe der gesamten Probenfläche entspricht. Für die Untersuchungsreihen mit verspannten Schraubverbindungen wurden passende Unterlegscheiben vom Typ DIN 440 R verwendet.



Bild 5.6: Verbindungsaufbau beider Schraubverbindungen

5.6 Verschraubungsprüfstand

Zur reproduzierbaren Schraubmontage und Untersuchung relevanter Montageparameter wurde der Verschraubungsprüfstand in Bild 5.7 verwendet. Er setzt sich zusammen aus der Schraubeinheit (Fa. Bosch Rexroth) und dem externen Messsystem zur Vorspannkraftmessung während der Schraubmontage. Der Verschraubungsprüfstand erfasst während der definierten Schraubmontage die Kenngrößen Drehmoment, Drehwinkel, Zeit, Vorspannkraft und Momentendifferenz aus Eindreh- und Überdrehmoment. An diesem Prüfstand wurden die Probekörper für die sich anschließenden Auszugsversuche montiert und die Montageversuche Überdrehversuch ohne Kopfreibung und Vorspannkraftmessung, Überdrehversuch mit Kopfreibung und Vorspannkraftmessung, Anzugversuch (vorspannkraftgesteuert) durchgeführt.

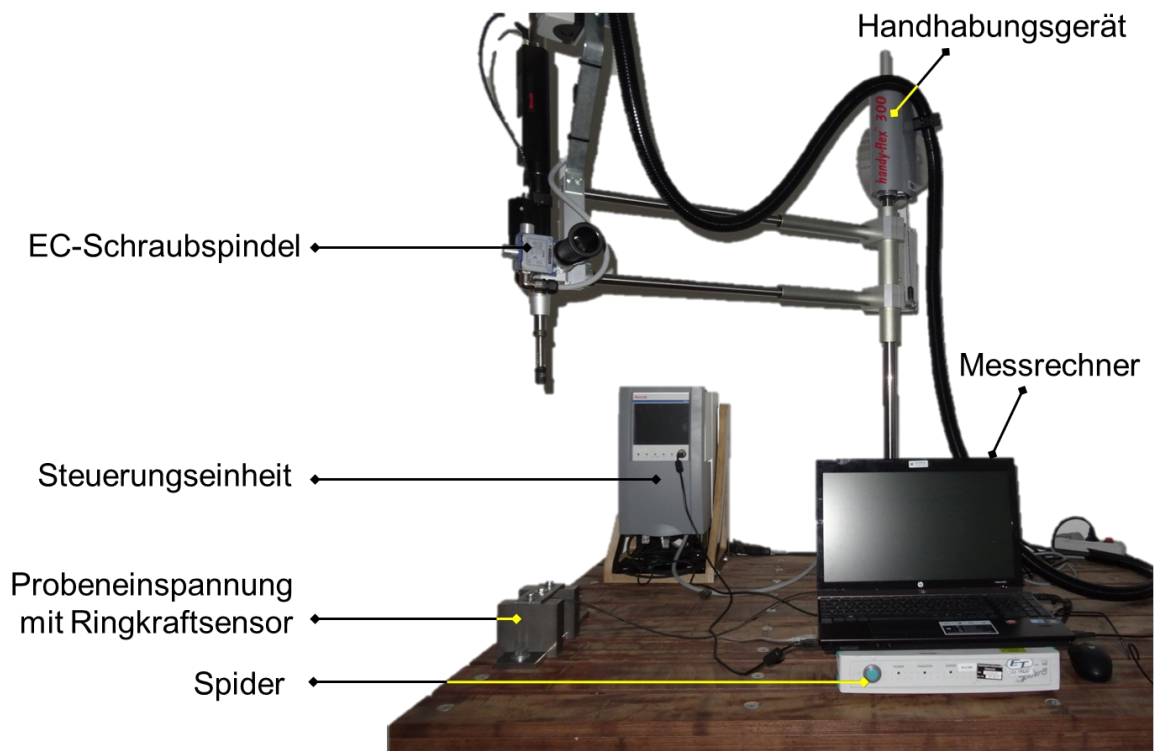


Bild 5.7: Verschraubungsprüfstand, EC-Schraubspindel Fa. Bosch Rexroth

5.6.1 Schraubeinheit und vorspannkraftgeregelter Spindelabschaltung

Für die Verschraubungsversuche wurde eine handelsübliche servomotorische EC-Schraubspindel der Baugröße 3 (Modell HF 300 - BG 3, Firma Bosch Rexroth, Murrhardt) verwendet. Der EC-Servomotor mit gekoppeltem Planetengetriebe realisiert Drehmomente von 40...45 Nm. Die Schraubeinheit ist mit zwei modular austauschbaren Messwertgebern ausgestattet, die in den Drehmomentbereichen bis 17 Nm und bis 60 Nm eine entsprechend hohe Auflösung gewährleisten. Es sind Drehzahlen bis maximal 740 U/min realisierbar. Die sehr kurzen Beschleunigungs- und Bremsphasen ermöglichen eine sehr präzise Schraubmontage.

Mittels der freiprogrammierbaren Steuerungseinheit CS351 ist die mehrstufige Schraubmontage über drehmoment-, drehwinkel- und streckgrenzengesteuertes Anzugverfahren möglich. Durch Mitverschrauben eines Ringkraftsensors war es möglich das vorspannkraftgesteuerte Anziehverfahren zu realisieren. Hierfür wird über das externe Messsystem, welches mit der Schraubspindel gekoppelt wurde, ein Signal generiert, das die Spindelabschaltung bei einem konkreten Vorspannkraftwert auslöst. Für die exakte Spindelabschaltung wurde eine hohe Abtastrate an der Messwerteinheit von 2400 Hz eingestellt.

5.6.2 Ringkraftsensoren und Messverstärker

Zur Vorspannkraftmessung während und nach der Schraubmontage wurden Ringkraftmesssensoren als messende Unterlegscheibe verwendet. Zum Einsatz kamen ausschließlich Ringkraftsensoren des Typs KMR 20 kN der Firma HBM für die Messung an Schrauben mit einem Nenndurchmesser von 6 mm. Diese sind für eine maximale axiale Kraft von 20 kN ausgelegt. Die Messdatenerfassung der Vorspannkraft erfolgte über die Messwerteinheit vom Typ Spider8 (Firma HBM). Dieser ist mit acht Messplätzen ausgestattet, welches die zeitgleiche Messung mehrerer Schraubverbindungen ermöglicht. Der Spider8 arbeitet mit einer Auflösung von 24 bit.

5.6.3 Probenaufnahme

Die Probenaufnahme in Bild 5.8 ist so konzipiert, dass die Probe beim Einschrauben und Anziehen der Schraube an der Drehmomentenabstützung nach oben gleiten kann. Die verschiebbaren Seitenwangen ermöglichen das Montieren verschiedener Probendicken zwischen 15 mm und 60 mm. Für die Montageversuche wurde der Probekörper stets mit einer 5 mm dicken Gegenplatte aus Stahlblech (Bohrung 7,5 mm) verschraubt, welches das Anbauteil darstellt. Das Stahlblech zur Kopfauflage diente der Ableitung des Drehmomentes in die Seitenwangen und verhindert gleichzeitig ein Mitdrehen des Sensors. Um die Schraubenkopfreibung zu minimieren, wurde ein axiales Rillenkugellager (BA7 SKF einseitig wirkend $D_1 = 7$ mm) mit verschraubt. Sobald Ermüdungserscheinungen im Lager eintraten, wie beispielsweise Schäden am Käfig, wurde das Rillenkugellager ausgetauscht. Zur Variation der Einschraublänge wurden Distanzscheiben und -platten vorgesehen.

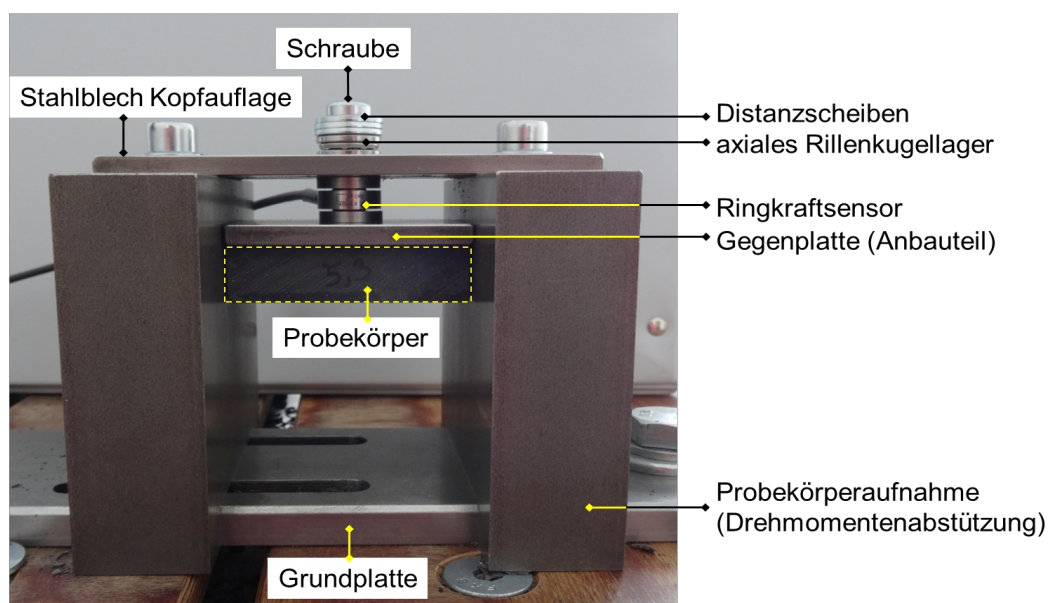


Bild 5.8: Probekörperaufnahme für Montageversuche (Überdrehversuch mit Kopfreibung)[Sch18a]

5.7 Montageversuche

Überdrehversuche mit/ ohne Kopfreibung

Je nach Versuchsziel wurden verschiedene Montageversuche durchgeführt. Im Überdrehversuch nach [Ehr04] wird die Schraube bis zum Versagen der Verbindung gedreht, um die maximal übertragbare Vorspannkraft beim Überdrehen, das Eindrehmoment und das Überdrehmoment zu ermitteln. Dieser Versuch dient zur Dimensionierung der Direktverschraubung hinsichtlich Kernlochdurchmesser, Bauteilbreite, Einschraublänge sowie der Untersuchung der Schraubengeometrie und des Werkstofftyps. In Abhängigkeit des zu untersuchenden Einflussparameters wurde der Überdrehversuch mit bzw. ohne Kopfreibung durchgeführt. Der Überdrehversuch mit Kopfreibung diente vorrangig zur Auslegung des Anzugmomentes. Im Überdrehversuch mit minimierter Kopfreibung wurde ein axiales Rillenkugellager unter dem Schraubenkopf mit verschraubt, um die Kopfreibung auf das Lagerreibmoment des axialen Rillenkugellagers zu reduzieren. Sofern nicht anders in den Ergebnissen angegeben, wurde die Einschraubgeschwindigkeit auf 100 U/min festgelegt. Mit Hilfe der Optimierungskriterien einer Direktverschraubung aus

- geringem Eindrehmoment,
- großem Überdrehmoment beim Versagen der Verbindung,
- maximaler Momentendifferenz aus Eindreh- und Überdrehmoment und
- hoher übertragbarer Vorspannkraft [Ona83]

werden die vorteilhaften Gestaltungsmerkmale der Direktverschraubung ermittelt. Der Momentendifferenz wird die größte Bedeutung zugesprochen. Je größer die Differenz, umso größer ist der Arbeitsbereich der Schraube. Damit ist eine sichere Schraubmontage gewährleistet [Ona83, Dra99, Ehr04].

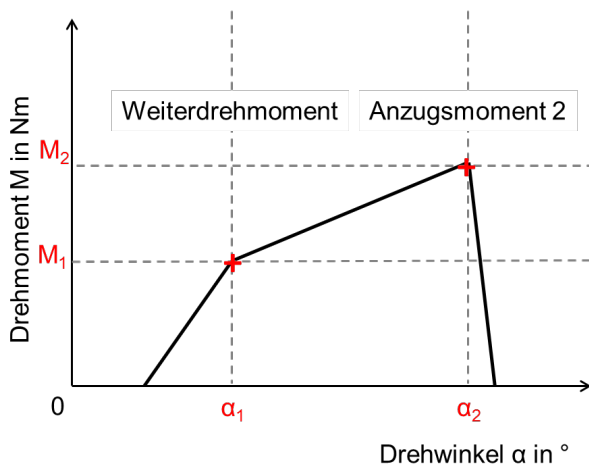
vorspannkraftgeregelter Anzugversuch

Der vorspannkraftgeregelte Anzugversuch dient dazu, die Vorspannkraft-Anzugmoment-Kurven zu ermitteln, da im Praxisfall die Schraubverbindungen drehmomentgeregelt vorgespannt werden. Das bedeutet, dass bei einer definierten Vorspannkraft (in kN) der Anziehvorgang stoppt und die Schraube mit definiertem Moment (in Nm) angezogen wurde. Des Weiteren dient der vorspannkraftgesteuerte Anzugversuch dazu, die Anfangsvorspannkraft für die Relaxationsversuche aufzubringen. Das Anziehen der Schraube erfolgte, sofern nicht anders angegeben, sehr langsam bei 5 U/min.

Weiterdrehversuch

Für die Untersuchung der Verbindungssteifigkeit nach verschiedenen Auslagerungsszenarien wurde der Weiterdrehversuch hinzugezogen. Dabei wurde nach einer definierten Zeit die Schraubverbindung auf ein definiertes Anzugsmoment 2 weitergedreht (Bild 5.9). Dieses entspricht dem Anzugsmoment zum ersten Anziehen der Schraube. Aus

der Drehmoment-Drehwinkelkurve wurde die Verbindungssteifigkeit zwischen dem Weiterdrehmoment und dem Anzugsmoment 2 aus dem Verhältnis der Drehmomentendifferenz zur Drehwinkeldifferenz nach Formel 18 berechnet.



$$\text{Steifigkeit} = \frac{M_2 - M_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (18)$$

Bild 5.9: Schematische Darstellung der Drehmoment-Drehwinkelkurve im Weiterdrehversuch und Ermittlung der Steifigkeit

5.8 Statischer Auszugsversuch ohne Vorspannkraft

Die statische Tragfähigkeit unverspannter Schraubverbindungen wurde im kurzzeitstatischen Schraubenauszugsversuch durchgeführt. Die Zugbelastungsrichtung lag hierbei stets parallel zur Einschraubrichtung. Der grundsätzliche Versuchsaufbau lehnte sich an die Normen DIN 320 „Bestimmung des achsenparallelen Schraubenauszieh-widerstands“ aus Span- und Faserplatten und DIN EN 13446 „Bestimmung des Haltevermögens von Verbindungsmitteln“ an. In der DIN 320 ist ein Mindestabstand zwischen Schraubenaußendurchmesser und Probekörperabstützung von beidseitig 15 mm gefordert. In der Normung entspricht es der Formulierung, „dass die geprüfte Oberfläche an keinem Punkt näher als 15 mm zum eingebetteten Teil der Schraube unterstützt wird“ [DIN 320]. In der Normung DIN EN 13446 ist der Abstand zwischen Probekörperabstützung und Kante des Befestigungsmittels auf 5 mm bis 10 mm festgelegt. Bei einem eingesetzten QGB mit $D = 20$ mm entspricht dies einem Gesamt-abstand der Probekörperabstützung von maximal 40 mm. Da im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Verbindungsmittel getestet werden, wird der Gesamt-abstand der Probe-körperabstützung einheitlich auf 40 mm festgelegt (vgl. Bild 5.10). Die statischen Auszugsversuche wurden auf der Prüfmaschine Z250 der Firma Zwick Roell mit dem Kraftaufnehmer 50 kN durchgeführt. Die Verbindungsmittel wurden mit einer Vorkraft von

50 N belastet und mit 10 mm/min aus dem Probekörper gezogen. Für den Auszug der Quergewindebolzen wurde eine hochfeste Gewindestange M6 12.9 verwendet, die am oberen Ende mittels einer Klemmbacke (Prismenbacke 8401) gespannt wurde. Die gewindeformenden Schrauben wurden unterhalb des Schraubenkopfes formschlüssig gelagert. Je Versuch wurden drei bis fünf Proben bis zum Totalversagen getestet und die Maximalkraft dokumentiert.

Es wurden zwei Versuchsmodifikationen durchgeführt, um sowohl den Montagefall als auch den Betriebszustand abzubilden. Die Versuchsmodifikationen unterscheiden sich durch den Beanspruchungszustand während des Verbindungsmittelauszugs. Bild 5.10 stellt den schematischen Versuchsaufbau für die Versuchsmodifikationen des statischen Auszugsversuches dar. Es gilt zu unterscheiden zwischen statischen Auszugsversuch mit (a) und ohne (b) Montageplatte.

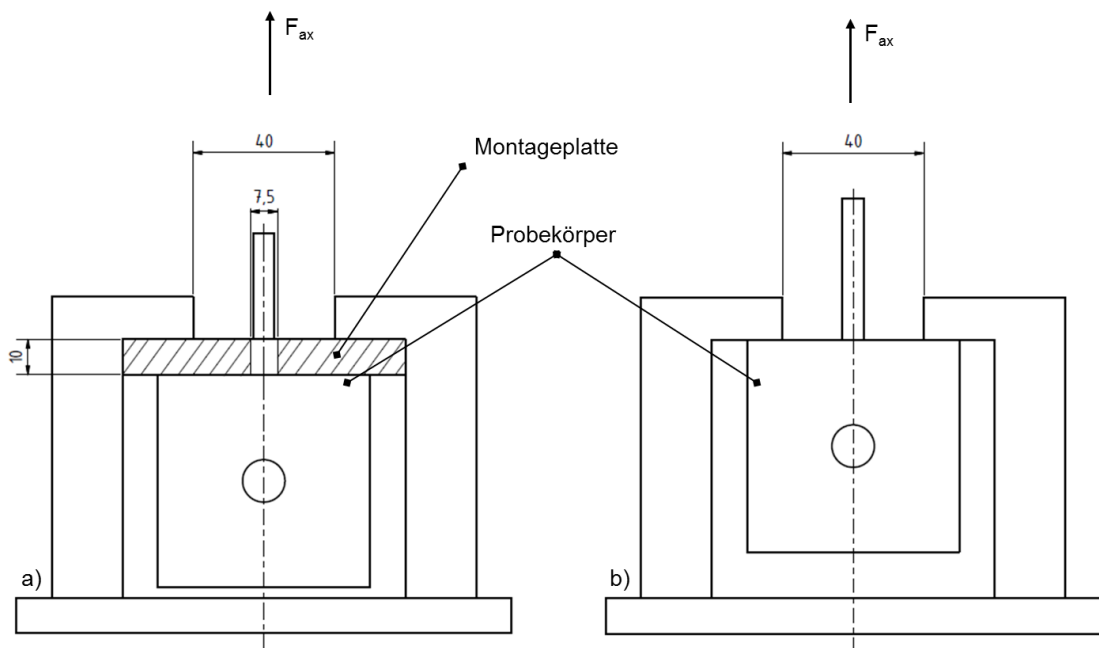


Bild 5.10: Schematischer Prüfaufbau für den statischen Auszugsversuch mit Montageplatte (a) und ohne Gegenplatte (b) [Sch18b]

a) statischer Auszugsversuch mit Montageplatte (Montagevorversuch)

Im Versuchsaufbau für den Montagefall wird eine definierte Gegenplatte zwischen Probe und Probenabstützung eingelegt, die das Anbauteil während der Montage darstellt. Sie ist mit einer zentrischen Durchgangsbohrung $d = 7,5$ mm versehen, durch die das Verbindungsmittel ausgezogen wird. Die Gegenplatte führt zum Zeitpunkt der maximalen Auszugskraft einen maximalen Gegendruck auf die Verbindungsstelle aus. Damit ist die ermittelte Auszugskraft der Montagevorspannkraft ohne Torsionsbeanspruchung der Schraube gleichzusetzen. Diese Versuchsmodifikation wird ausschließlich für die QGB-

Steckschraubverbindung als Montagevorversuch angewendet, da für die gesamte Parametervariation Auszugskräfte größer gleich 20 kN zu erwarten sind.

b) statischer Auszugsversuch ohne Gegenplatte

Das Ausziehen des Verbindungsmittels aus dem Werkstoff erfolgt hierbei ohne Gegendruck. Der freie Auszugsbereich ist durch den Abstand der Probekörperabstützung auf 40 mm definiert. Die ermittelte Auszugskraft stellt die maximale Schraubenkraft bzw. Verankerungskraft des Verbindungsmittels dar. Diese Versuchsmodifikation wird für beide Verbindungsarten angewendet. Ziel dieses Versuchsaufbaus ist es, die statische Verankerungskraft des Verbindungsmittels im Grundwerkstoff zu bestimmen. Aus der ermittelten Maximalkraft lässt sich unter Berücksichtigung der im Werkstoff verankerten Fläche des Verbindungsmittels der statische Ausziehparameter berechnen.

statischer Ausziehparameter

Die Berechnung des statischen Ausziehparameters f_{ax} erfolgt für Holzwerkstoffe über die erreichte Maximalkraft bei Schraubenauszug und der vorhandenen Fläche des tragenden Gewindes. Diese Fläche berechnet sich nach DIN 1382 näherungsweise aus der Eindringtiefe und dem Schaftdurchmesser des Verbindungsmittels gemäß Formel 19.

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{d \cdot l_d} \quad [\text{DIN 1382}] \quad (19)$$

$$f_{ax} = \frac{F_{max}}{A_{ef}} \quad [\text{Eck12}] \quad (20)$$

ECKARDT erweiterte die näherungsweise Berechnung um die Kenngrößen des Kernlochdurchmessers sowie der Gewindesteigung und des Schraubenkerndurchmessers, um die effektiv im Grundwerkstoff verankerte Gewindefläche A_{ef} hinreichend genau zu beschreiben [Eck12, S. 157]. Die im Grundwerkstoff abgewinkelte Flanken-geometrie des Gewindes ist näherungsweise die Fläche eines Rechteckquerschnittes. Damit werden die hier verwendeten variablen Flanken-geometrien vernachlässigt.

Die effektiv wirksame Gewindefläche nach *ECKARDT* in Formel 20 dient im Rahmen dieser Arbeit als Berechnungsgrundlage des statischen Ausziehparameters f_{ax} . Da für diesen Versuch die Verbindungsmittel so montiert wurden, dass die Schraubenenden nicht im Grundwerkstoff verankert waren, ist die Komponente des Gewindeauslaufes zu vernachlässigen. Die Anzahl der im Grundwerkstoff verankerten Gewindegänge t_g berechnet sich aus Einschraublänge dividiert durch die Gewindesteigung P . In der Berechnung der effektiv im Grundwerkstoff verankerten Gewindefläche bleibt die Flanken-geometrie unbeachtet.

Für die untersuchten Schrauben ist mit einem Kernlochdurchmesser $d_k = 5 \text{ mm}$ und der Einschraublänge $l_E = 15 \text{ mm}$ die effektive im Grundwerkstoff verankerte Gewindefläche A_{ef} in Tabelle 5.3 berechnet.

$$A_{ef}(t_G) = s_G \cdot b_G \quad (21)$$

$$b_G = r_A - r_B \quad (22)$$

$$s_G(t_G) = \sqrt{((2\pi \cdot r_m)^2 + P^2) \cdot t_G} \quad (23)$$

$$r_m = \frac{r_A + r_B}{2} \quad (24)$$

Tabelle 5.3: Berechnungswerte für die effektiv wirksame Gewindefläche A_{ef} für $l_E = 15 \text{ mm}$

Schraube für	Holzwerkstoffe	Thermoplaste	Leichtmetalle	Duroplaste
Bezeichnung	KOKF	STSplus®	Altracs®	SDS®
t_G	5,76	7	15	10,7
r_A [mm]	3,08	3,03	3	3
r_B [mm]	2,5	2,5	2,5	2,5
b_G [mm]	0,58	0,53	0,5	0,5
s_G [mm]	102	122,4	259,6	185,7
A_{ef} [mm²]	58,7	64,35	129,8	92,86

5.9 Statischer Auszugsversuch mit Vorspannkraft

Der statische Auszugsversuch an verspannten Proben verfolgte die Zielstellung sowohl die statische Tragfähigkeit als auch die Verbindungssteifigkeit der vorgespannten Einschraubverbindungen zu ermitteln.

Für diesen Versuch wurden Probekörper der Maße 100 x 60 x 15 mm verwendet. Die um 40 mm größere Probenlänge als bei dem statischen Auszugsversuch ohne Vorspannkraft ist für die Probeneinspannung notwendig. Die Einschraubrichtung lag parallel zur Extrusionsrichtung. Als Anbauteil fand eine 5 mm dicke Stahlplatte mit zentrischer Durchgangsbohrung $d = 7,5 \text{ mm}$ Verwendung.

Für die vergleichende Untersuchung beider Verbindungsarten war es notwendig, die im Grundwerkstoff verankerte Fläche einheitlich auf $146,7 \text{ mm}^2 + 0,1 \text{ mm}^2$ festzulegen. Die Berechnung der Verankerungsfläche erfolgte für die Direktverschraubung nach den Formeln aus Kapitel 5.8. Für die QGB-Steckschraubverbindung wurde die projizierte Fläche A_{proj} des Quergewindebolzens abzüglich der Fläche der Sacklochbohrung mit $d = 6,5 \text{ mm}$ zugrunde gelegt. Die Festlegung der Verankerungsfläche und die für jede

Einschraubverbindung separaten konstruktiven Kenngrößen wurden nach den Versuchsreihen der konstruktiven Einflussparameter festgelegt. Tabelle 5.4 fasst diese und die eingesetzten Verbindungsmittel zusammen. Den Versuchsaufbau stellt Bild 5.11 dar.

Tabelle 5.4: Verbindungsmittel und konstruktive Parameter im statischen Auszugsversuch mit Vorspannkraft

Einschraubverbindung	Direktverschraubung	QGB-Steckschraubverbindung
Einschraubrichtung	parallel zur S-PE	parallel zur S-PE
Verbindungsmittel	STSpluss® 10.9 $d_1 = 6 \text{ mm}$, $l_s = 65 \text{ mm}$	M6 x 65 mm 10.9 QGB M6 $D_1 = 12 \text{ mm}$, $L_B = 16 \text{ mm}$
Konstruktive Kenngrößen	$d_k = 5 \text{ mm}$ $l_E = 34,2 \text{ mm}$ $t = 15 \text{ mm}$	$e = 30 \text{ mm}$ $D_2 = 6,5 \text{ mm}$ $t = 15 \text{ mm}$ $w = 60 \text{ mm}$
Verankerungsfläche A_{Ver}	$146,7 \text{ mm}^2$	$146,8 \text{ mm}^2$

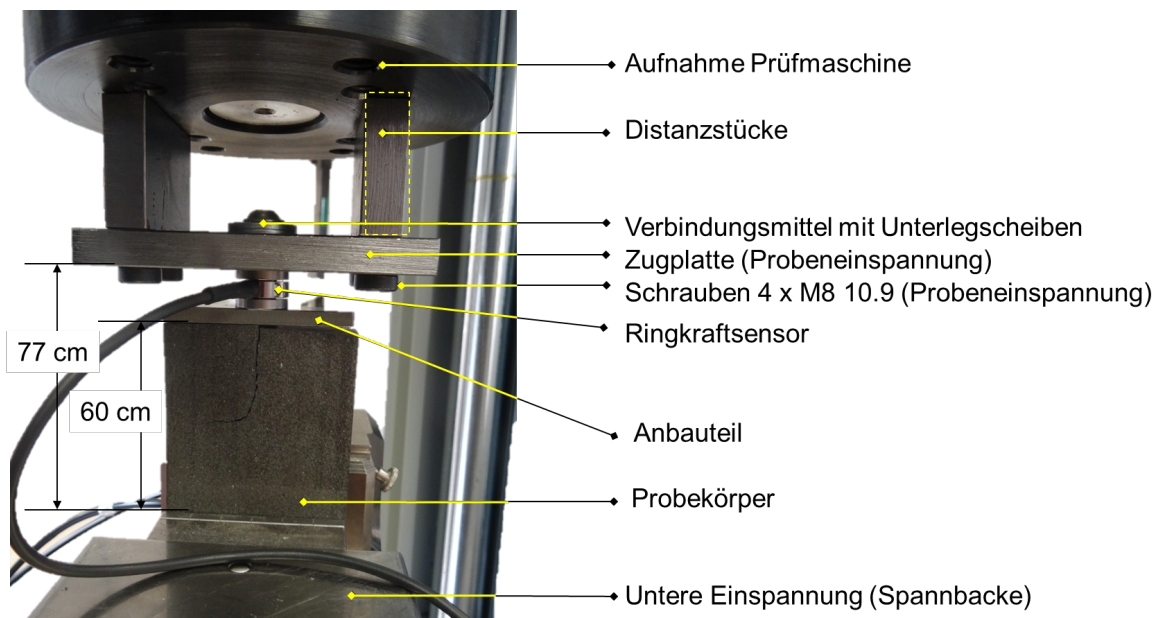


Bild 5.11: Probeneinspannung für den statischen Auszugsversuch mit Vorspannkraft [Sch18a]

Der Versuchsablauf wurde so gestaltet, dass direkt vor der mechanischen Prüfung jede Einzelprobe mit definierter Vorspannkraft montiert wurde. Hierfür wurde ein Ringkraft-

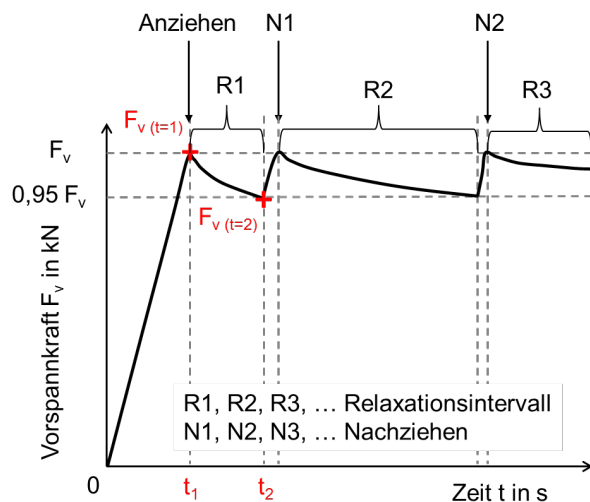
sensor im Klemmkontakt mit verschraubt. Dieser misst sowohl die Montagevorspannkraft als auch den Verlauf der Vorspannkraft im Klemmkontakt während des gesamten statischen Auszugsversuchs. Die Schraubverbindungen wurden mittels Schraubspindel definiert mit 5 U/min auf 2, 4, 6, 9 kN angezogen. Zur hinreichend genauen Spindelabschaltung bei geforderter Vorspannkraft wurde die Abtastrate auf 2400 Hz eingestellt. Für die nachfolgende Vorspannkraftmessung während des Versuches wurde die Abtastrate auf 50 Hz reduziert. In direktem Anschluss nach der Montage erfolgte der Einbau der Zugplatte mit angeschraubtem Probekörper in die Prüfmaschine.

Die Proben wurden mit 50 N Vorlast beaufschlagt und mit 10 mm/min auf der Prüfmaschine Zwick Z250 auseinandergezogen. Je Versuchscharge wurden fünf Einzelproben getestet. Die Verbindungssteifigkeit wird aus der Kraft-Verformungs-Kurve zwischen 10% und 40% von F_{\max} berechnet.

5.10 Nachziehversuche

Im Fokus der Untersuchung stand es, neben der Wirkungsweise des Nachziehens ein technisch sinnvolles Nachziehintervall für die Einschraubverbindungen zu ermitteln. Hierfür wurden die Einschraubverbindungen gemäß der Ausführung in Tabelle 5.4 mit den Vorspannkraften 2, 4, 6, 8, 9 kN beaufschlagt und nach einem festgelegten Nachziehintervall auf die Vorspannkraft des ersten Anziehens nachgezogen.

Das Eindrehen der Schraube erfolgte mit 100 U/min bis zur Kopfauflage und das Anziehen vorspannkraftgeregelt mit 5 U/min. Um eine hohe Abschaltgenauigkeit bei einer definierten Vorspannkraft zu erreichen, wurde die Abtastrate auf 1200 Hz bis 2400 Hz eingestellt. Das Nachziehen wurde manuell ausgelöst, sobald die absolute Vorspannkraft in der Schraubverbindung auf jeweils 95% der Anfangsvorspannkraft $F_{v(t=0)}$ abgesunken war. Die Verbindung wurde so oft nachgezogen, bis die Relaxationsgeschwindigkeit innerhalb eines Nachziehintervalles den Wert von 0,5 N/s unterschritt. Die festgelegten Schwellwerte ergaben sich aus Vorversuchen und dem Hintergrund, dass der gesamte Nachziehvorgang innerhalb einer Stunde abgeschlossen sein sollte. Diese Festlegung stützen sich auf die Tatsache, dass das Nachziehen von Kunststoff-Schraubverbindungen innerhalb der ersten 10 Minuten bis einer Stunde nach Montagestopp am effektivsten ist [Tom00]. Je Verbindungsart und Vorspannkraft wurden fünf Einzelversuche durchgeführt. Dabei wurden bei jeder Schraubung neue Verbindungsmittel verwendet. Für jedes Nachziehen wird neben der stetig aufgezeichneten Vorspannkraft das Anzugmoment vermerkt. Für die Versuchsauswertung wurde in jedem Relaxationsintervall die Kraft- und Zeitdifferenz ermittelt und das Verhältnis aus beiden Größen gebildet. Dies entspricht der jeweiligen Relaxationsgeschwindigkeit. Das Relaxationsintervall kennzeichnet den Vorspannkraftverlauf zwischen zwei Schraubenanzügen (vgl. Bild 5.12). Für das erste Relaxationsintervall stellt Formel 25 beispielsweise die Berechnung der Relaxationsgeschwindigkeit dar.



$$\frac{(F_{v(t=1)} - F_{v(t=2)})}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta F}{\Delta t} \quad (25)$$

Bild 5.12: Schematische Darstellung des Nachziehens und der Relaxationsintervalle

5.11 Kontinuierliche Vorspannkraftrelaxationsmessung

5.11.1 Aufbau, Messtechnik, Extrapolation

Die Vorspannkraftrelaxationsversuche dienen dazu, neben dem zeitlichen Verlauf der Schraubenvorspannkraft die Wirkung der Einflussfaktoren Materialfeuchtigkeit und Nachziehen der Schraubverbindung zu untersuchen. Gegenstand der Untersuchung bilden die QGB-Steckschraubverbindung und die Direktverschraubung. Sie wurden für jede Versuchsmodifikation einheitlich nach Bild 5.13 und den Parametern in Tabelle 5.4 aufgebaut. Je Versuchsmodifikation wurden drei Einzelmessungen angestrebt.

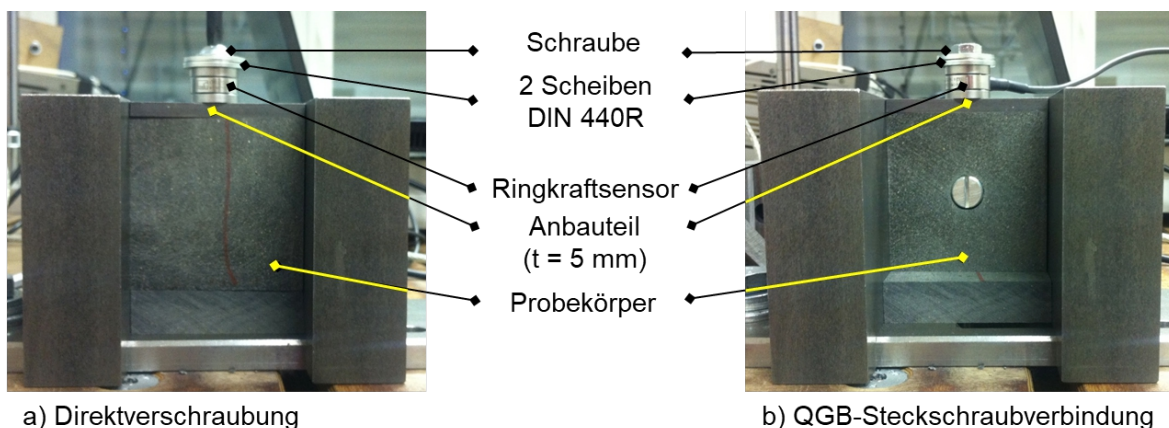


Bild 5.13: Versuchsaufbau der getesteten Schraubverbindungen, Probekörper 60 x 60 x 15 mm, Schraubenlänge 55 mm

Bei allen Einzelversuchen wurde der zeitliche Verlauf der Vorspannkraft über die Ringkraftsensoren erfasst und über die Messwerteinheit MGC der Firma HBM aufgezeichnet. Diese Messwerteinheit ermöglicht die zeitgleiche Datenaufzeichnung von mehreren Schraubverbindungen vom Montagestart bis zum Ende der Langzeitmessung. Um eine hinreichend genaue Spindelabschaltung für das vorspannkraftgeregelte Anziehverfahren zu erreichen, wurde mit einer anfänglichen Abtastezeit von 2400 Hz gearbeitet. Nachdem der jeweilige Anziehvorgang abgeschlossen war, wurde die Abtastezeit für die Langzeitmessung auf 0,05 Hz reduziert.

Um von der durchgeführten Vorspannkraftmessung mit einer maximale Messzeit von 3,5 Monaten auf den Vorspannkraftabfall nach mehreren Jahren zu schließen, wurden die Messwerte mit Hilfe des angepassten Findley-Ansatzes (Formel 26) extrapoliert. Diese Extrapolationsstrategie wurde in den Arbeiten von [Dra99, Tom00, Yao11] bereits für Kunststoff-Direktverschraubungen angewendet. In dieser Formel beschreibt der Ausdruck $m \cdot t^p$ den viskosen und viskoelastischen Anteil mit der Belastungszeit t und den von der Vorspannkraft abhängigen Werkstoffkonstanten m und p . Die Werkstoffkonstanten werden mittels linearer Regression der Kennwerte im doppel-logarithmischen Diagramm ermittelt.

$$F_v(t) = \frac{F_v(t=0)}{1 + m \cdot t^p} \quad [\text{Tom00}] \quad (26)$$

5.11.2 Vorspannkraftmessung bei zunehmender Materialfeuchtigkeit

Um die Feuchtigkeitsaufnahme von Probenmaterial und deren Schraubverbindungen in Produktionsstätten abzubilden, wurden die in Tabelle 5.5 dargestellten Szenarien simuliert. Die über 3,5 Monate stetig zunehmende Materialfeuchtigkeit wird über die Kombination der Probenvorkonditionierung und der anschließenden Auslagerung verspannter Schraubverbindungen im Holznormklima abgebildet.

Tabelle 5.5: Abgebildete Szenarien für die Vorspannkraftrelaxation in Produktionsstätten

Szenarium	Vorkonditionierung Proben	Testklima Verschraubung
Feuchtigkeitsaufnahme der verspannten Schraubverbindung Schraubenvorspannkraft unterliegt klimatischer Schwankung	Darrtrocknen bis Massekonstanz bei 103°C	Holznormklima (20°C, 65% rel. LF) Dauer = 110 Tage
nahezu keine Feuchtigkeitsaufnahme der verspannten Schraubverbindung Schraubenvorspannkraft unterliegt keinen klimatischen Schwankung	Holznormklima (20°C, 65% rel. LF) Dauer = 110 Tage	Holznormklima (20°C, 65% rel. LF) Dauer = 110 Tage

Nach Abschluss der Vorkonditionierung wurden die Proben gebohrt. Die Schraubverbindungen wurden nach Bild 5.13 aufgebaut und mit definierter Vorspannkraft ($F_v = 4 \text{ kN}$, $F_v = 8 \text{ kN}$) angezogen. In direktem Anschluss wurden die Schraubverbindungen in die Klimakammer (Fa. Airtemp, Typ: LKG-K-80-040/200, Temperatur $\pm 0,5 \text{ K}$, Feuchte $\pm 3\%$) gestellt. Über die Versuchsdauer von 3,5 Monaten relaxierten beide Verbindungsarten im Normklima für Holzwerkstoffe bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit. Da nur eine Klimakammer für beide Materialchargen zur Verfügung stand, wurde der Prüfablauf der unterschiedlich vorkonditionierten Proben nacheinander durchgeführt. Zu den Zeitpunkten vor der Probenkonditionierung, vor Testbeginn und nach Abschluss der Relaxationsversuche wurde das Gewicht gemessen, um die Feuchtaufnahme während des Relaxationsversuches zu ermitteln.

5.11.3 Vorspannkraftmessung mit Schraubennachzug

Für die Versuchsreihe zum Nachziehen der Schraubverbindung wurden die Direktverschraubungen nach dem in Bild 5.13 dargestellten Aufbau montiert. Sie wurden mit den Vorspannkraften 2 kN, 6 kN und 8 kN verspannt. Um den Einfluss des Schraubennachzugs innerhalb der Montage auf den Vorspannkraftabfall abzubilden, wurden einige Schraubverbindungen in den ersten 30 Minuten mehrmals nachgezogen. Der angewendete Nachziehrhythmus ergab sich aus den Ergebnissen zum Nachziehen der Schraubverbindung Kapitel 6.3.2. Mittels mitverschraubter Ringkraftsensoren wurde das vorspannkraftgeregelte Anziehverfahren angewendet. Die Verbindungen mit Schraubennachzug wurden auf die Anfangsvorspannkraft nachgezogen, sobald die Vorspannkraft auf 95% der Anfangsvorspannkraft abgefallen war. Sowohl die Konditionierung des Probenmaterials als auch die Messung erfolgte im Raumklima bei 20°C bis 24°C und 30 % bis 35 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Auswertung der Vorspannkraftkurven erfolgte nachdem die letzte Schraubverbindung nachgezogen wurde.

5.12 Mikroskopische Analyse

Die mikroskopische Analyse des Werkstoffgefüges und der Verbindungsstelle wurde im Auflichtverfahren mit den Lichtmikroskopen Olympus DSX 110 und Keyence VHX-100 durchgeführt. Hierfür wurde das Probenmaterial in Epoxydharz eingebettet und bis zu einer 4000er Körnung geschliffen bzw. poliert. Für die Präparation der Verbindungsstelle wurde die Probe parallel zur Schraubachse bis auf die Tiefe des Schraubenkopfes fräsend abgetragen. Anschließend in Epoxydharz eingebettet und bis zur Mittelebene der Schraube abgeschliffen, sodass das Mikroskopiebild den Querschnitt der Verbindungsstelle darstellt. Mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware wurde die Verankerungslänge V_{FL} entlang der Flanke an je 28 Flanken gemäß Bild 5.14 vermessen und daraus der Mittelwert gebildet. Die Mikroskopie verfolgte den Zweck den Gewindeeingriff der

gewindeformenden Schraube und die Druckzone des Quergewindebolzens zu analysieren.

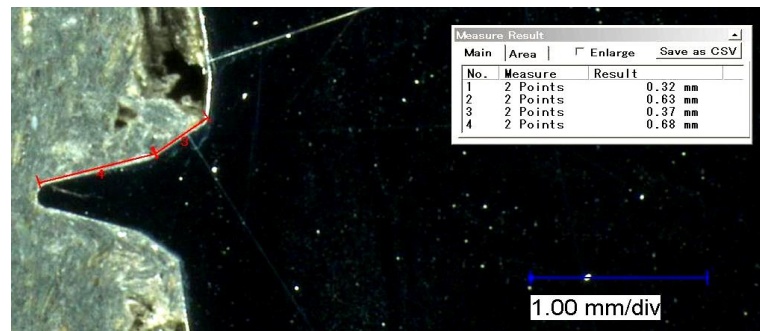


Bild 5.14: Ausmessen der Verankerungslänge V_{FL} mittels Auflichtmikroskopie in der Direktverschraubung, Schraube für Thermoplaste Schriefer STSplus (Vergrößerung 50x)

6 Ergebnisse

6.1 Konstruktive Einflüsse der Direktverschraubung

6.1.1 Schraubengeometrie

Die Diagramme in Bild 6.1 stellen sowohl die statische Auszugskraft als auch den statischen Ausziehparameter f_{ax} in Abhängigkeit der untersuchten Schraubentypen beispielhaft für den Werkstoff WPC-5 dar. Die Gesamtübersicht aller Testwerkstoffe ist im Anhang im Bild A 1 dargestellt.

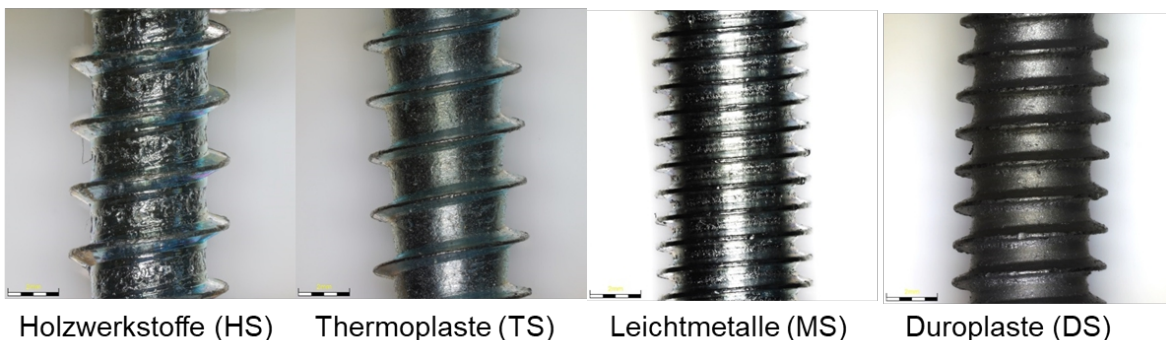
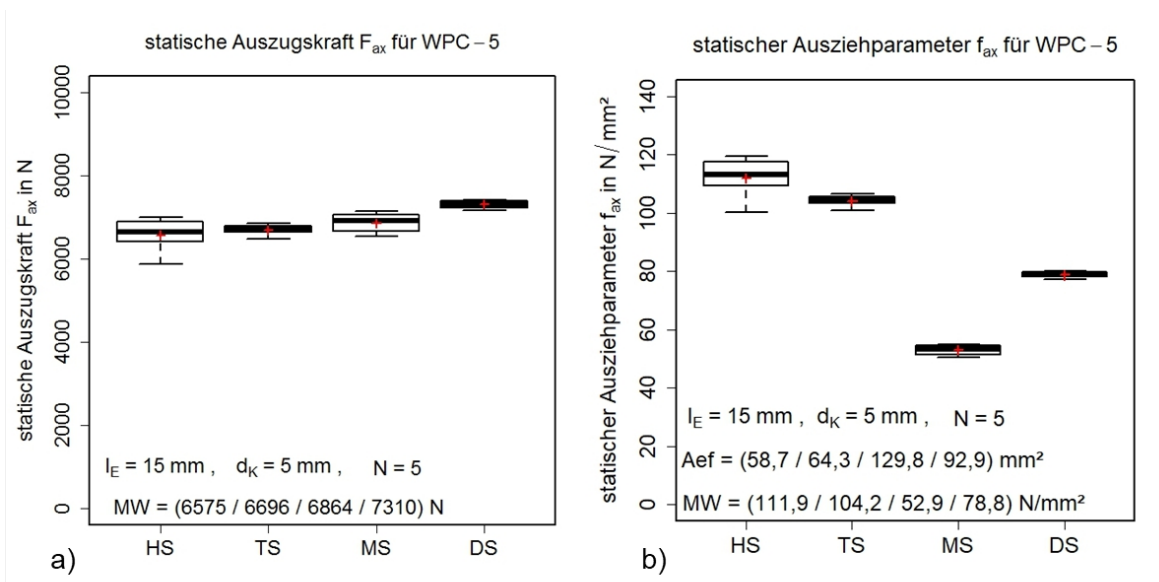


Bild 6.1: Statische Auszugskraft (a) und statischer Ausziehparameter (b) der Schraube für Holzwerkstoffe HS, Thermoplaste TS, Leichtmetalle MS und Duroplaste DS aus dem Material WPC-5, ermittelt im statische Auszugsversuch mit $v = 10 \text{ mm/min}$, Materialfeuchtigkeit = 1,12%.

Der zugrundegelegte Kernlochdurchmesser d_K beruht hierbei auf einer Vorversuchsreihe, bei dieser zunächst das händische Einschrauben der gewindeformenden Schrauben

getestet wurde. Dabei zeigte sich, dass das Eindrehen der Schrauben unabhängig von der Flankenometrie und trotz vorhandener Bohrspitzen in den hochverdichteten Holz-Polymer-Werkstoffen nicht möglich war. Die Einschraubstelle riss zum einen infolge zu hoher Radialspannungen vollständig auf, zum anderen spante die Schraube den Werkstoff in der Einschraubstelle komplett aus. Aus diesem Grund ist das Einschrauben ohne Vorbohren, wie es beispielsweise in Holzwerkstoffen angestrebt wird, in hochverdichteten Holz-Polymer-Werkstoffen nicht möglich. Bei dem für die Auszugsversuche zugrundegelegten Kernlochdurchmesser d_K von 5 mm handelt es sich um den kleinsten Durchmesser mit dem ein schadfreies und händisches Eindrehen möglich war. Für die Berechnung des statischen Ausziehparameters f_{ax} wurde die effektiv im Grundwerkstoff verankerte, tragende Fläche zugrunde gelegt, deren Berechnung nach [Eck12] erfolgte und in Kapitel 5.8 beschrieben ist.

Der statische Ausziehparameter f_{ax} der getesteten Holz-Polymer-Werkstoffe liegt trotz der unterschiedlichen Rezepturzusammensetzung der Halbzeuge in einem ähnlichen Bereich. Alle getesteten Schraubverbindungen versagten durch Schraubenauszug. Das Muttergewinde wurde dabei abgeschert. Hinsichtlich ihrer statischen Auszugskraft F_{ax} unterschieden sich die getesteten Schraubentypen kaum voneinander. Erst unter Berücksichtigung der im Werkstoff verankerten tragenden Gewindefläche A_{ef} wird deutlich, dass die Schrauben für Thermoplaste und Holzwerkstoffe eine deutlich höhere statische Ausziehfestigkeit (statischen Ausziehparameter) gegenüber den Schraubentypen für Duroplaste und Leichtmetalle in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen besitzen.

Allein die Beurteilung des statischen Ausziehparameters ist nicht aussagekräftig genug, um die Anwendbarkeit der hier untersuchten Schraubentypen näher zu differenzieren und eine Empfehlung abzuleiten. Aus diesem Grund wird der Fügeprozess in Form des Überdrehversuches mit integrierter Vorspannkraftmessung hinzugezogen. Da sich die zu untersuchenden Schrauben in ihrer Schraubenkopfgeometrie unterscheiden, ist es notwendig das Kopfreibmoment bestmöglich zu vereinheitlichen. Dazu wurde ein axiales Rillenkugellager mit verschraubt. Das Kopfreibmoment lies sich damit auf das Lagerreibmoment reduzieren. Aufgrund des ähnlichen Materialverhaltens der WPCs und der ähnlichen Ergebnislage im statischen Schraubenauszugsversuch wurden die Überdrehversuche zunächst an dem Werkstoff WPC-5 vorgenommen. Um dem vorzeitigen Versagen durch Rissbildung entgegenzuwirken, wurde die Bauteilbreite mit $B = 60$ mm und die Probendicke mit $t = 30$ mm ausreichend groß gewählt.

Die Diagramme in Bild 6.2 stellen die Montagekenngrößen Eindrehmoment M_E , Überdrehmoment M_U , Momentendifferenz dM und maximal übertragbare Vorspannkraft F_{vmax} der Schrauben für Holzwerkstoffe, Thermoplaste und Leichtmetalle in Abhängigkeit des Kernlochdurchmessers dar.

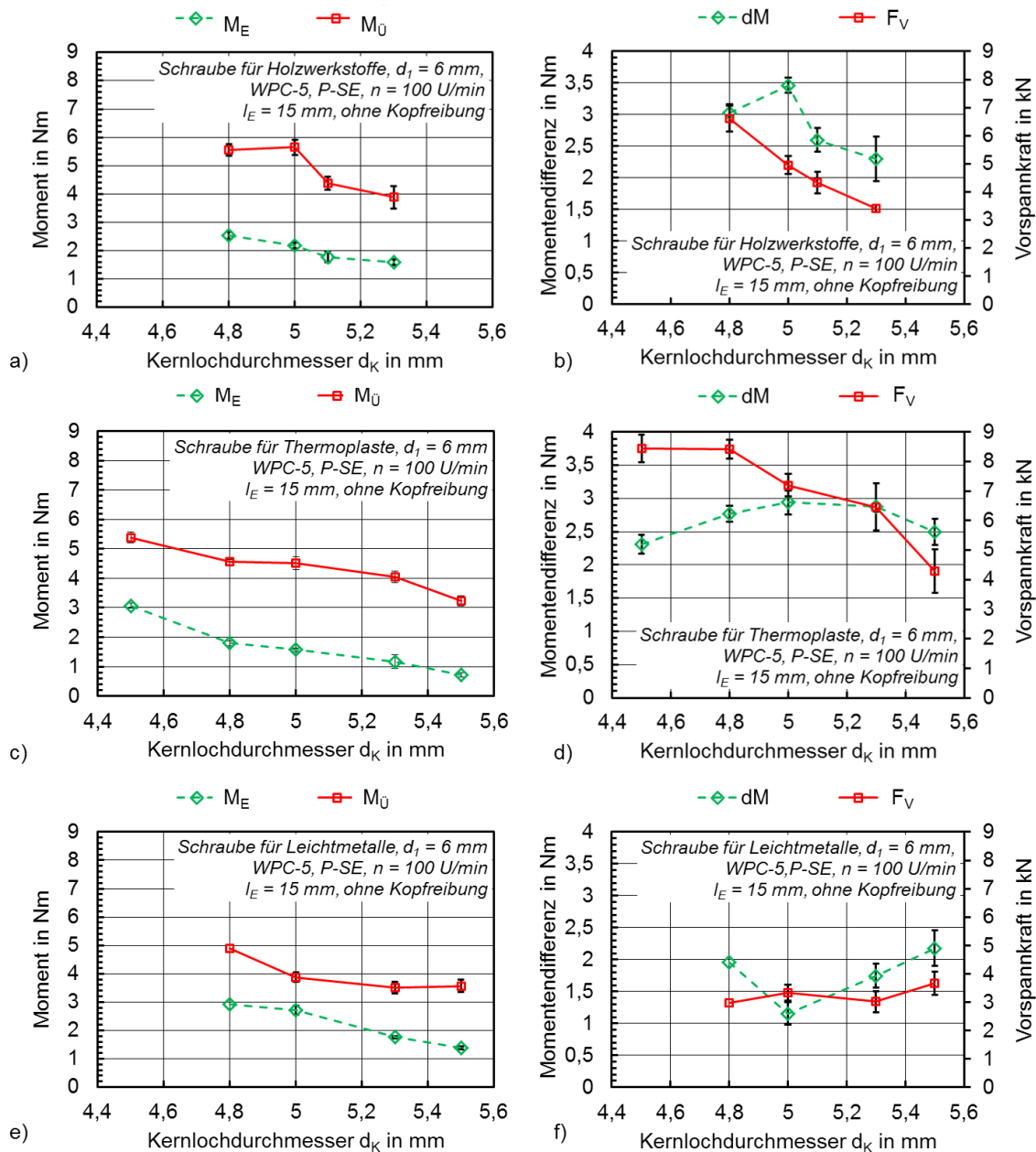


Bild 6.2: Montageparameter dM , M_E , $M_{\bar{U}}$, F_{vmax} im Überdrehversuch mit minimierter Kopfreibung der Direktverschraubung mit den Schraubentypen Holzschraube (a, b) Schraube für Thermoplaste (c, d) und Schraube für Leichtmetalle (e, f) in WPC-5, Richtung P-SE. Materialfeuchtigkeit = 1,4%, $N = 5$. [Sch18a]

Im Vergleich der drei Schraubentypen zeigt sich, dass die Spezialschraube für Thermoplaste bei allen Kernlochdurchmessern im Einschraubprozess das geringste Eindrehmoment benötigt. Dies resultiert aus dem geringen zu verdrängenden Werkstoffvolumen und der geringen Materialbeanspruchung. Verantwortlich dafür ist der geringe Flankenwinkel des Gewindes, der einen leichten Materialabfluss ermöglicht und die Kraftkomponente in radialer Richtung reduziert. Ein vorzeitiges Aufreißen der

Einschraubstelle wird damit vermieden [Sch15]. Dieser Vorteil der Spezialschraube ist auch in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen wirksam. Übertragen auf die Gesamtdimensionierung der Verbindungsstelle bedeutet dies, dass ein tieferes Einschrauben zur Erhöhung der Vorspannkraft möglich ist, ohne dabei die Bauteilbreite größer dimensionieren zu müssen.

Während sich die Spezialschrauben für Thermoplaste und Holzwerkstoffe in der maximal erreichten Momentendifferenz dM kaum unterscheiden, heben sie sich von der Leichtmetallschraube ab. Des Weiteren weist die Spezialschraube für Thermoplaste über die variierten Kernlochdurchmesser einen toleranteren Verlauf der Momentendifferenz dM auf. Ein um 0,2 mm größerer Kernlochdurchmesser d_k führt zu keiner deutlichen Verringerung des Schraubenarbeitsbereiches, im Gegensatz zu den Spezialschrauben für Leichtmetalle und Holz hingegen schon.

Im Vergleich der maximal übertragbaren Vorspannkraft F_{vmax} der Schraubentypen ist deutlich zu erkennen, dass die Spezialschraube für Thermoplaste bei gleicher Einschraublänge gegenüber der Holzschraube eine um 1 kN bzw. gegenüber der Leichtmetallschraube eine um 4 kN größere maximale Vorspannkraft übertragen kann. Die Ursache ist im geringen Flankenwinkel von 30° und der größeren Flankenlänge zu finden, mit der sich die Spezialschraube für Thermoplaste von denen für Holz- und Leichtmetalle abhebt.

Aus den aufgezeigten Montagekennwerten der untersuchten Schraubentypen lässt sich schlussfolgern, dass die Schraube für Thermoplaste aufgrund des geringsten Eindrehmomentes M_E , einer hohen Momentendifferenz dM bei gleichzeitig maximal übertragbarer Vorspannkraft F_{vmax} die technisch vorteilhafteste für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe ist.

6.1.2 Kernlochdurchmesser

Der grundlegende Einfluss des Kernlochdurchmessers d_k auf die Montagekenngrößen und die Auszugskraft ist Stand der Technik und nicht Gegenstand dieser Versuchsreihe. Vielmehr rückt der Werkstoffeinfluss auf den Kernlochdurchmesser in den Vordergrund, um für die getesteten Holz-Polymer-Werkstoffe den technisch vorteilhaften Kernlochdurchmesser abzuleiten. Grundlage dieser Versuchsreihe bildet der Schraubentyp für Thermoplaste, dessen vorteilhaften Ergebnisse in Kapitel 6.1.1 beschrieben sind.

In Bild 6.3 sind die Montagekenngrößen im Überdrehversuch bei minimierter Kopfreibung in Abhängigkeit des Kernlochdurchmessers und der getesteten WPC-Werkstoffe dargestellt. Zusätzlich sind die Montagekenngrößen des jeweiligen Matrixmaterials mit eingebunden. Hierfür wurde der vom Schraubenhersteller empfohlene Kernlochdurchmesser d_k für das jeweilige Matrixmaterial zugrunde gelegt [Sch15].

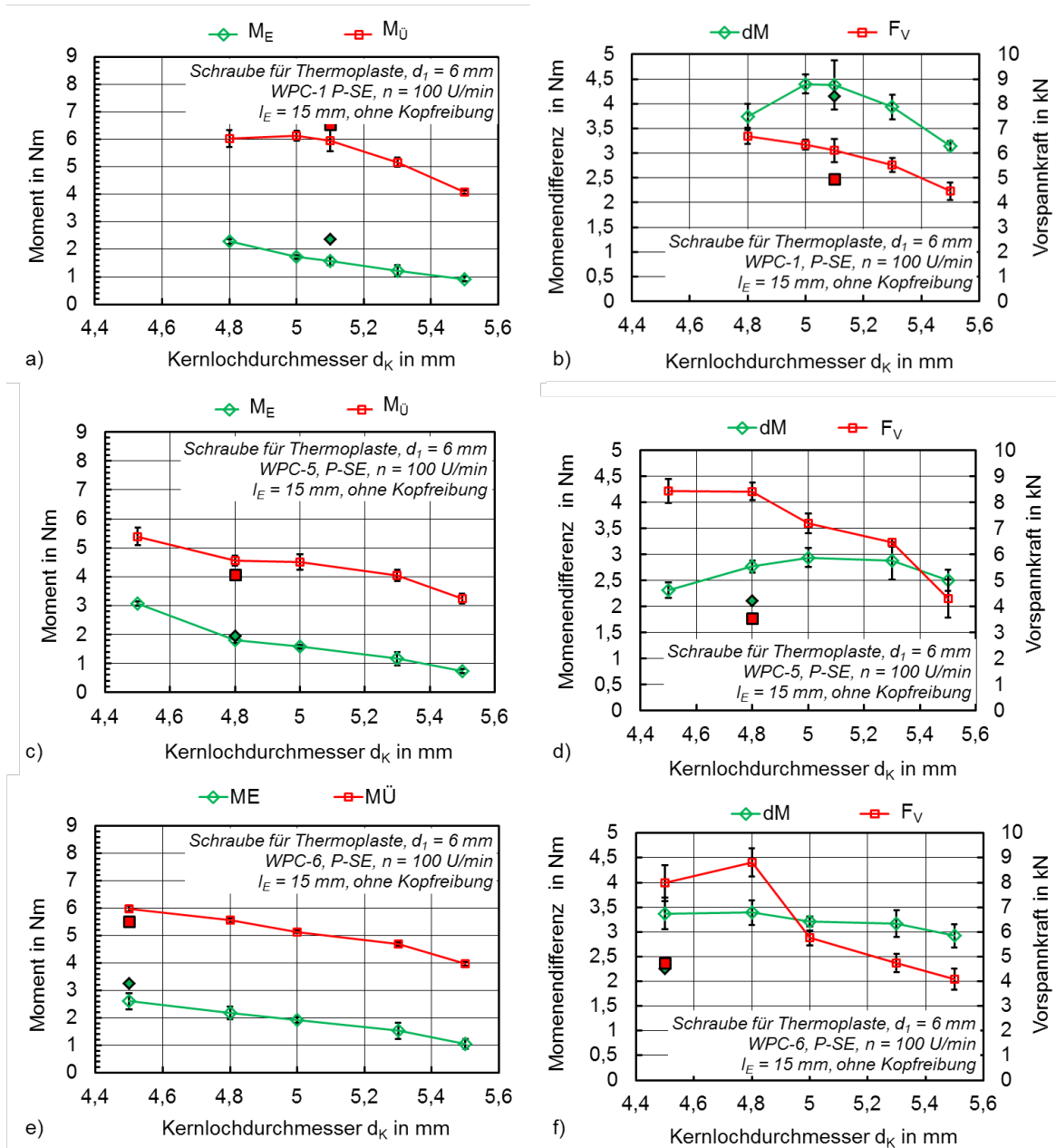


Bild 6.3: Montageparameter dM , M_E , $M_{\bar{U}}$, F_{vmax} im Überdrehversuch mit minimierter Kopfreibung der Direktverschraubung mit für den Schraubentyp Schriever STS plus $d_1 = 6$ mm in den Werkstoffen WPC-1 (a, b), WPC-5 (c, d) und WPC-6 (e, f). Materialfeuchtigkeit = 1,2 - 2%, $N = 5$, [Sch18a]. Gefüllte Datenpunkte = Werte für Matrixmaterial (PVC, PE-HD, PP).

Aus der maximalen Momentendifferenz dM zwischen Eindreh- M_E und Überdrehmoment $M_{\bar{U}}$ sowie der maximal übertragbaren Vorspannkraft F_{vmax} erfolgt die Ableitung des vorteilhaften Kernlochdurchmessers. Aufgrund der Tatsache, dass die Vorspannkraft über die Einschraublänge erhöht werden kann, ist das dominierende Kriterium die Momentendifferenz dM für die Ermittlung des Kernlochdurchmessers d_K . Im Vergleich zum ungefüllten Matrixmaterial weisen alle WPC-Werkstoffe höhere Momentendifferenzen und höhere

Vorspannkraften auf (vgl. Bild 6.3). Dieser Effekt ist vermutlich abhängig vom eingebrachten Holzfüllstoffanteil, da der WPC-Werkstoff mit dem höchsten Holzfüllstoffanteil, den größten Vorspannkraftzuwachs erfährt. Eine fundiertere Aussage ist hierbei nicht zu treffen, da die Werkstoffeinflüsse aus Matrixmaterial, Additive, Verarbeitung, Holzfaserart und Holzanteil nicht separierbar sind. Die im Vergleich zu den Matrixmaterialien größere Momentendifferenz dM wird sowohl durch geringere Eindrehmomente als auch größere Überdrehmomente erreicht, mit Ausnahme des Werkstoffes WPC-1, dessen M_0 unterhalb seines Matrixmaterials PVC liegt. Da das zu verdrängende Volumen sowohl für die Matrixmaterialien als auch für die WPC-Werkstoffe unter Berücksichtigung des identischen Kernlochdurchmessers gleich ist, ist der Reibwert zwischen Gewindeflanke und Werkstoff ausschlaggebend für die geringeren Eindrehmomente. Dies lässt den Schluss zu, dass der Holzfüllstoffanteil zu einer Verringerung des Gleitreibwertes beigetragen hat.

Der empfohlene Kernlochdurchmesser d_K bei maximaler Momentendifferenz dM verschiebt sich im Vergleich zum ungefüllten Matrixmaterial hin zu größeren Werten, mit Ausnahme des WPC-1 auf PVC-Basis. Aus den Ergebnissen der maximalen Momentendifferenz leiten sich folgende Kernlochdurchmesser für die verschiedenen Holz-Polymer-Werkstoffe ab:

WPC-1 (PVC-Basis), $d_1 = 6 \text{ mm}$:	$d_K = 5,1 \text{ mm}$
WPC-5 (PE-Basis), $d_1 = 6 \text{ mm}$:	$d_K = 5 \text{ mm}$
WPC-6 (PP-Basis), $d_1 = 6 \text{ mm}$:	$d_K = 4,8 \text{ mm}$

6.1.3 Einschraublänge in Abhängigkeit von der Einschraubrichtung

Zur Beurteilung des Einflusses der Werkstoffanisotropie auf die Einschraubrichtung werden die Montagegrößen im Überdrehversuch bei minimierter Kopfreibung hinzugezogen. Bild 6.4 stellt die Montageparameter Vorspannkraft F_{vmax} und Momentendifferenz dM in Abhängigkeit der Einschraublänge l_E für die jeweilige Einschraubrichtung dar. Die Variation der Einschraublänge l_E in Plattenebene senkrecht zur Extrusionsrichtung ist, aufgrund der größeren Bauteildicke, ausschließlich an den Konstruktionsbohlen realisiert worden.

Der Verlauf der Montageparameter in Abhängigkeit der Einschraublänge l_E reiht sich nahezu werkstoffunabhängig in die bekannten Sachverhalte des Standes der Technik ein. So nimmt mit zunehmender Einschraubtiefe l_E die Vorspannkraft F_{vmax} und das Überdrehmoment M_0 bis zum Erreichen des Schraubenbruchmomentes M_{SB} zu, wo hingegen das Eindrehmoment M_E nahezu konstant bleibt bzw. einen geringen Anstieg erfährt [Ona83, Dra99, Ehr04]. Die mit der Einschraublänge l_E zunehmende Momentendifferenz dM ermöglicht damit das Aufbringen höherer Anzugmomente M_A , respektive Vorspannkraft F_v . Der Richtungseinfluss stellt sich besonders in Bezug auf die maximal übertragbare Vorspannkraft F_{vmax} ein, wobei die Momentendifferenzen dM kaum bis gar

keine Unter-schiede aufweisen. Bei allen Versuchswerkstoffen werden in Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion höhere Vorspannkkräfte erreicht als in Scheibenrichtung. Der Unterschied ist werkstoff- und halbzeugabhängig mehr oder weniger stark ausgeprägt. Der richtungs-abhängige Einfluss ist für die Konstruktionsbohle des Werkstoffes WPC-5 (Bild 6.4 b) und WPC-6 am größten und beträgt maximal 3 kN.

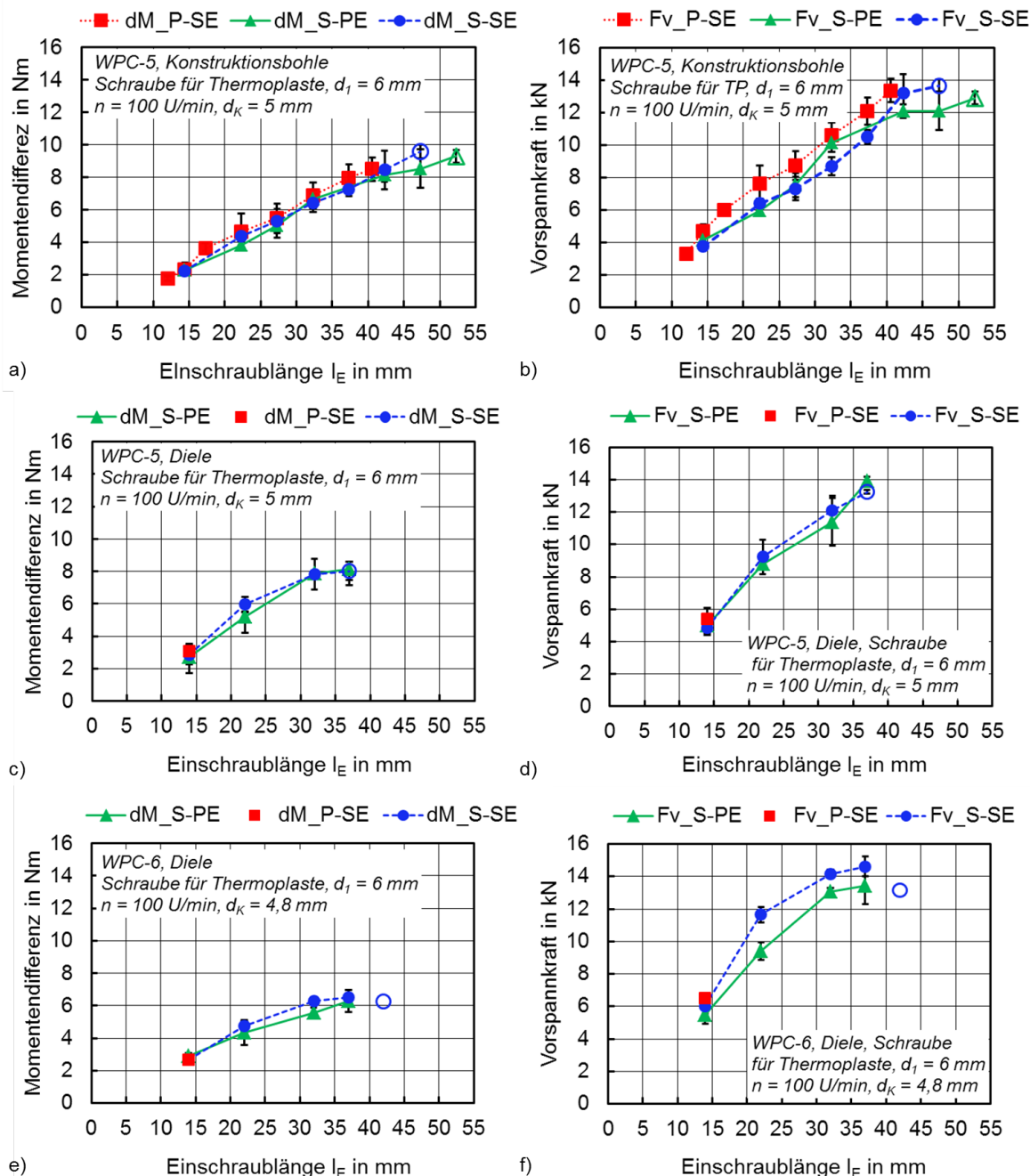


Bild 6.4: Montageparameter im Überdrehversuch bei minimierter Kopfreibung mit variabler Einschraublänge, in den Werkstoffen WPC-5 (a, b, c, d) und WPC-6 (e, f). Leere Punkte = Schraubenbruch M_{SB} , Materialfeuchtigkeit = 1,5%, $N = 5$.

In Scheibenrichtung lässt sich nur für das Material WPC-6 ein Unterschied hinsichtlich der Extrusionsrichtung erkennen. Hier liegt der Unterschied zwischen Scheibenrichtung parallel zur Extrusion und Scheibenrichtung senkrecht zur Extrusion bei einer Vorspannkraftdifferenz von 3 kN. Dieser Unterschied ist auf die im Versuchswerkstoff WPC-6 am stärksten ausgeprägte 3D-Füllstofforientierung zurückzuführen. Für die anderen Versuchswerkstoffe WPC-1 und WPC-5 ist über die gesamte Einschraublänge l_E keine abweichende Vorspannkraft zwischen S-PE-Richtung und S-SE-Richtung ersichtlich gewesen. Die Ergebnisse des Testwerkstoffes WPC-1 sind im Anhang dem Bild A 2 beigelegt. Aus diesem Grund können die Kennwerte der Einschraubrichtungen S-PE und S-SE für die Werkstoffe WPC-1 und WPC-5 zu einer Messreihe zusammengefasst werden.

Der generelle Richtungseinfluss ist durch die senkrecht zur Schraubachse verlaufende Füllstofforientierung zu erklären, die dem Schubversagen beim Überdrehen der Schraube entgegen wirkt. Die Querschnittsbilder des abgescherten Muttergewindes beider Einschraubrichtungen zeigt Bild 6.5.

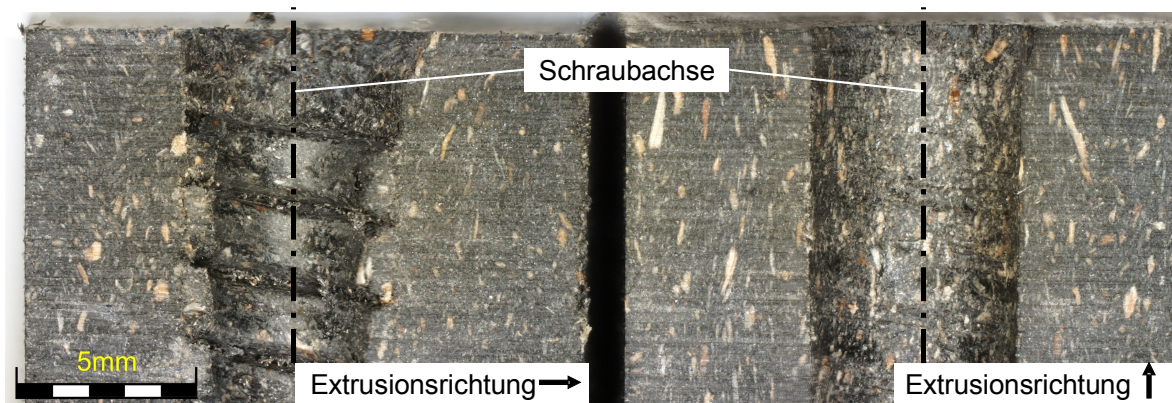


Bild 6.5: Gewindeeingriff nach dem Versagen im Überdrehversuch für die Einschraubrichtung senkrecht zur Extrusionsrichtung S-SE (links) und parallel zur Extrusionsrichtung S-PE (rechts), Werkstoff WPC-6, Schraube STS plus $d_1 = 6 \text{ mm}$, $d_K = 5 \text{ mm}$

Wird die Schraube senkrecht zur Extrusionsrichtung eingeschraubt, können höhere Kräfte übertragen werden, da sich die Gewindeflanken besser zwischen den einzelnen holzbasierenden Füllstoffen verankern. Das Schadensbild nach dem Überdrehversuch in Bild 6.5 zeigt einen eckigen Rissverlauf entlang der Gewindegänge, welcher mit Herausreißen einzelner holzbasierender Füllstoffe einhergeht. Im Schadensbild sind die noch vorhandenen Gewindegänge ersichtlich. Liegt die Einschraubrichtung parallel zum Füllstoffverlauf / zur Extrusionsrichtung scheren die Gewindegänge beim Überdrehen vollständig ab. Es entsteht während des Gewindeabscherens eine glatte Trennebene (Bild 6.5 rechts).

Unabhängig von der Einschraubrichtung versagten die Schraubverbindungen im Überdrehversuch grundsätzlich durch Abscheren des geformten Gewindes. Je nach Werkstoff traten zusätzlich Schraubenbrüche während des Überdrehversuches ab einer Einschraubtiefe von 37 mm für WPC-5 und WPC-6 (Diele) sowie 42 mm für die Konstruktionsbohle des Materials WPC-5 auf. Bei diesen Einschraubtlängen ist mit dem Bruchmoment der Schraube die mechanische Leistungsfähigkeit der Schraube erreicht und die Verbindung maximal dimensioniert. Bezogen auf den Nenndurchmesser der Schraube lässt sich für hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe folgende maximale Einschraubtlängen definieren:

$$l_{E_{max}} = 6 \dots 7 \cdot d_1 \quad (\text{mit } d_1 = 6 \text{ mm}) \quad (27)$$

6.1.4 Bauteildicke t und Bauteilbreite B

Ziel der Versuchsreihe war es, die Mindestbauteildicke und -breite zu ermitteln, ab der kein Rissversagen der Einschraubstelle während der Montage eintritt. Um die Einschraubstelle unter der Gesamtbelastung zu testen, d. h. einschließlich des Kopfreibmomentes wurde der Überdrehversuch mit Kopfreibung an der Konstruktionsbohle des Materials WPC-5 angewendet. Es wurde ausschließlich in die Werkstoffrichtungen S-PE und P-SE unterschieden, da die vorangegangene Ergebnislage in Kapitel 6.1.3 für das benannte Material keine Unterschiede hinsichtlich der Einschraubrichtung in S-PE und S-SE aufzeigte. Es wird in die Teilversuchsreihen a) Bauteilbreite $B \gg$ Bauteildicke t und b) Bauteilbreite $B =$ Bauteildicke t unterschieden. Damit werden die Anwendungsfälle Verschrauben einer dünnen Platte und Verschrauben eines Bauteil mit quadratischem Querschnitt (quadratisches Kantholz) abgebildet. Für die Versuche wurde eine mittlere Einschraubtlänge l_E von 26 mm gewählt, sodass bei ausreichender Bauteildicke t ein Schraubenauszug und kein Schraubenbruch zu erwarten ist. Da bei geringeren Einschraubtlängen l_E die Einschraubstelle eine größere Umfangsdehnung bei gleicher Montagevorspannkraft erfährt [Ona82 S.80], ist eine kleinere Einschraubtlänge von $l_E = 16$ mm mit untersuchungsrelevant.

Bauteilbreite B verhältnismäßig groß gegenüber Bauteildicke t (Plattenabmessung)

Bild 6.6 stellt die Montageparameter Vorspannkraft F_{vmax} und Momentendifferenz dM in Abhängigkeit der Bauteildicke t für die Einschraubrichtungen Platte senkrecht zur Extrusionsrichtung und Scheibe parallel zur Extrusionsrichtung dar. Darin wird deutlich, dass in Abhängigkeit der Einschraubrichtung eine Grenzbauteildicke existiert, bei der die Montageparameter sinken. Dies geht mit der geringeren mechanische Belastbarkeit der Verbindungsstelle einher. Der Kurvenverlauf beider Diagramme zeigt, dass der Abfall der Montageparameter mit kleiner werdenden Bauteildicken t in Plattenrichtung, senkrecht zur Extrusion wesentlich stärker ausgeprägt ist, als parallel zur Extrusionsrichtung. Gleichzeitig geht in P-SE-Richtung die Kennwertminderung mit der Rissentstehung einher. In S-PE-Richtung treten vor dem Kennwertabfall bereits Risse auf. In beiden Einschraub-

richtungen sinken die Montagekennwerte bei Bauteildicken t kleiner 12 mm ab. Die Rissbildung beim Einschrauben in Scheibenrichtung parallel zur Extrusionsrichtung (S-PE) tritt bis zu einer Bauteildicke von $t = 10$ mm auf, in Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion hingegen bis $t = 12$ mm Dicke.

Unter Berücksichtigung des Schadensverlaufes während des Überdrehversuches wird deutlich, dass die Rissentstehung mit der Gewindeabscherung des porösen Materials während des Überdrehens der Schraube einhergeht. Das Abscheren des geformten Gewindes führt zu einer lokalen Spananhäufung, die eine Vergrößerung der Radialspannung nach sich zieht und bei entsprechend kleinen Bauteildicken t zur Rissentstehung entlang der Schraubachse beiträgt.

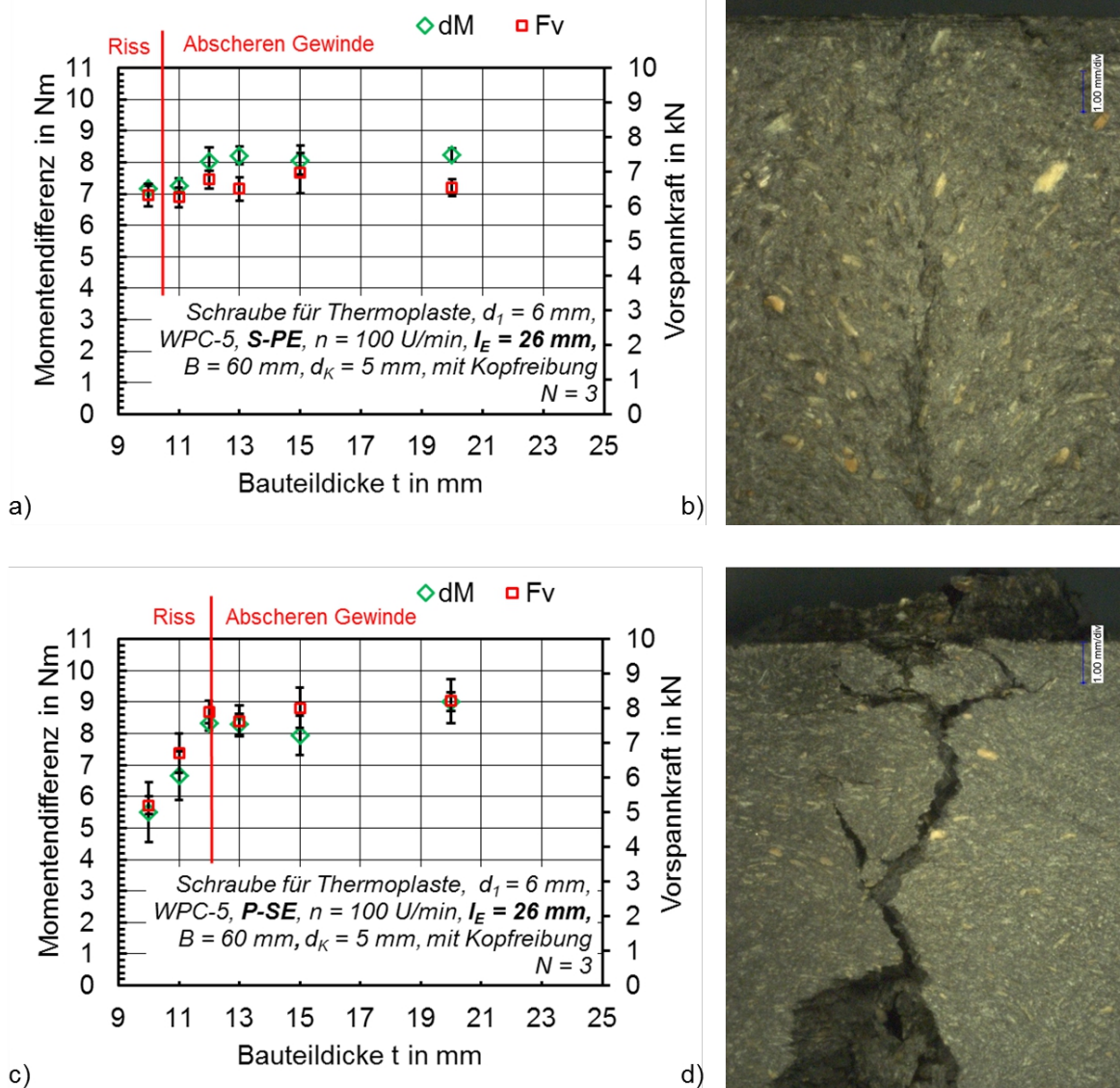


Bild 6.6: Montageparameter und Rissverlauf im Überdrehversuch mit Kopfreibung mit variabler Bauteildicke bei konstanter Bauteilbreite für die Einschraubrichtung parallel zur Extrusion (a, b) und Platte, senkrecht zur Extrusion (c, d) in WPC-5, Konstruktionsbohle [Sch18a].

Die Ursache des richtungsabhängigen Spaltverhaltens der Einschraubstelle ist auf die Orientierung der holzbasierenden Füllstoffe während des Extrusionsprozesses zurückzuführen. Die Gewindeflanken initiieren im Material mit einem Füllstoffverlauf parallel zur Gewindeflanke (senkrecht zur Schraubachse) Spaltrisse, die das Aufreißen der Einschraubstelle selbst bei größeren Bauteildicken t nach sich zieht. Verläuft die Füllstofforientierung parallel zur Schraubenachse und damit senkrecht zur Gewindeflanke wirken die holzbasierenden Füllstoffe möglicherweise als Risshemmer der Rissbildung entgegen. In der Folge reißt die Einschraubstelle erst bei geringerer Bauteildicke t auf.

Da sich zwischen S-PE und P-SE Richtung nur ein geringer Unterschied hinsichtlich der Mindestbauteildicke t herausgestellt hat, ist der Richtungsunterschied im Sinne einer einfachen Montage zu vereinheitlichen. Um das Spalten der Einschraubstelle zu vermeiden, sind Bauteildicken $t \geq 13$ mm für den Anwendungsfall, dem Verschrauben extrudierter Profile mit $B > t$, anzuwenden.

Bauteilbreite B entspricht der Bauteildicke t

Zur Untersuchung der Mindestbauteilbreite B und der Mindestbauteildicke t für quadratische Bauteile wurden gleichnamige Versuche an quadratischen Probekörpern hinzugezogen. Die Bauteilbreite B entspricht hierbei der Bauteildicke t und wurde für die Einschraublängen $l_E = 16$ mm und $l_E = 26$ mm zwischen 11 mm bis 20 mm variiert. Es ist zu berücksichtigen, dass die Absolutwerte nicht mit vorangegangenen Ergebniswerten zur Bauteildicke t vergleichbar sind, da der Versuchswerkstoff aus einer späteren Fertigungscharge stammt.

Die Diagramme und Schadensbilder in Bild 6.7 zeigen für die Einschraubrichtung senkrecht zur Extrusion, dass für beide Einschraublängen l_E ab Bauteildicken t und Bauteilbreiten B kleiner 15 mm die Einschraubstelle aufreißt und die Montagekennwerte sinken. Dieses Ergebnis stellte sich ebenfalls für die Einschraubrichtung parallel zur Extrusionsrichtung ein. Bei den getesteten Bauteilbreiten $B = 11$ mm und $B = 12$ mm trat das Aufreißen der Einschraubstelle bereits während des Einschraubens vor dem Erreichen der Kopfauf-lage auf, sodass das Aufbringen einer Vorspannkraft teilweise nicht möglich war.

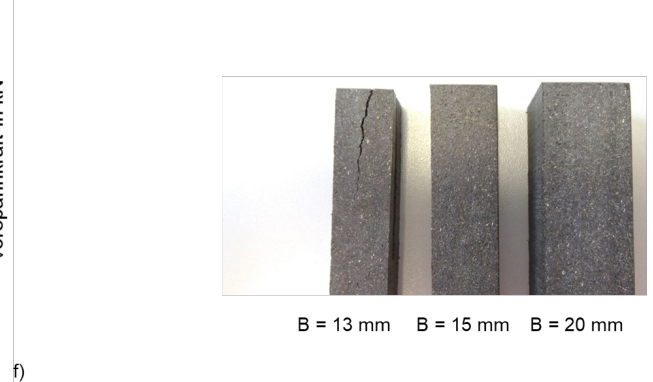
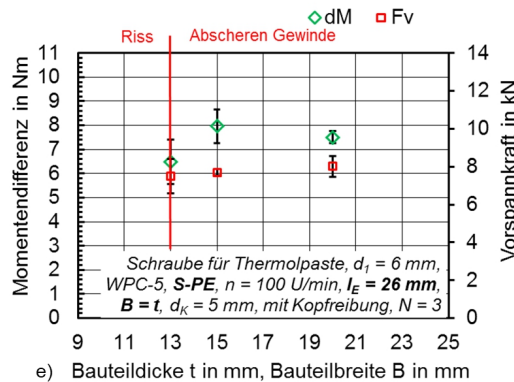
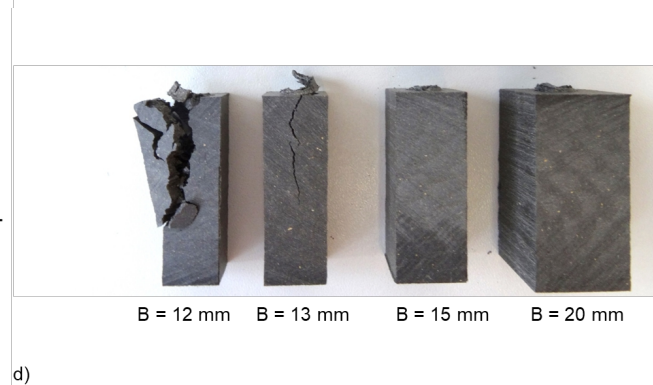
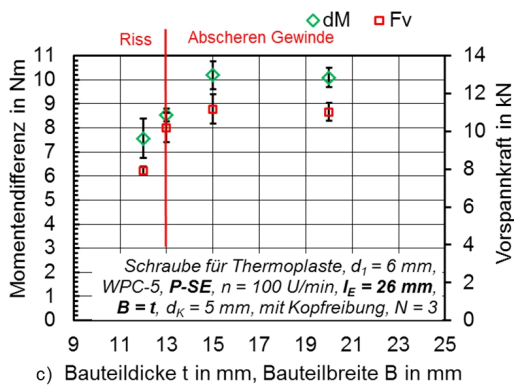
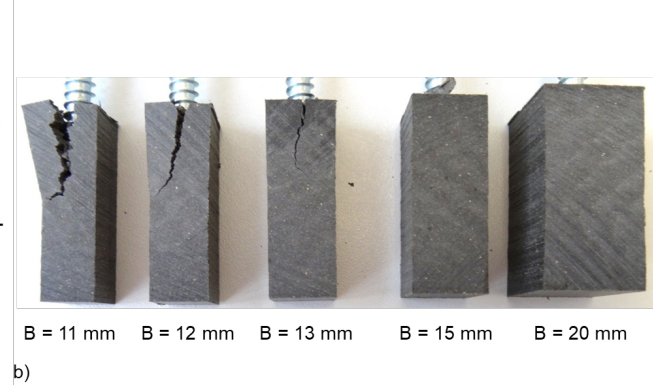
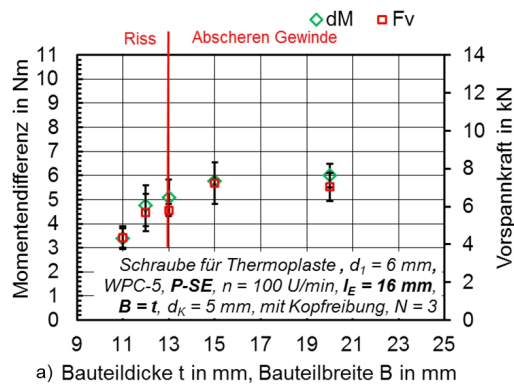


Bild 6.7: Montageparameter und Rissverlauf im Überdrehversuch mit Kopfreibung mit variabler Bauteildicke und Bauteilbreite für die Einschraubrichtung parallel zur Extrusion (a - d) und Platte, senkrecht zur Extrusion (e, f) in WPC-5, Konstruktionsbohle

6.2 Konstruktive Einflüsse der QGB-Steckschraubverbindung

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der konstruktiven Einflussparameter auf die QGB-Steckschraubverbindung dargestellt. Für die in Bild 6.8 aufgeführten Einschraubrichtungen ist zu berücksichtigen, dass in P-SE Richtung die Eindringtiefe e des Bolzens von der Halbzeugdicke begrenzt ist und für die hier verwendeten Halbzeuge und Bolzen keine Verschraubung in der benannten Richtung zulässt. Daher wird nachfolgend ausschließlich in die Einschraubrichtungen S-PE und S-SE unterschieden. Die Durchführbarkeit des Überdrehversuches mit integrierter Vorspannkraftmessung ist auf eine

maximale Vorspannkraft von 20 kN begrenzt. Bei der Versuchsdurchführung werden teilweise größere Vorspannkraften erwartet. Um die gesamte Parametervariation anhand eines Versuchskonzeptes durchzuführen, wurde der Auszugsversuch mit Montageplatte angewendet. Der Überdrehversuch wird ausschließlich an der Vorzugslösung durchgeführt.

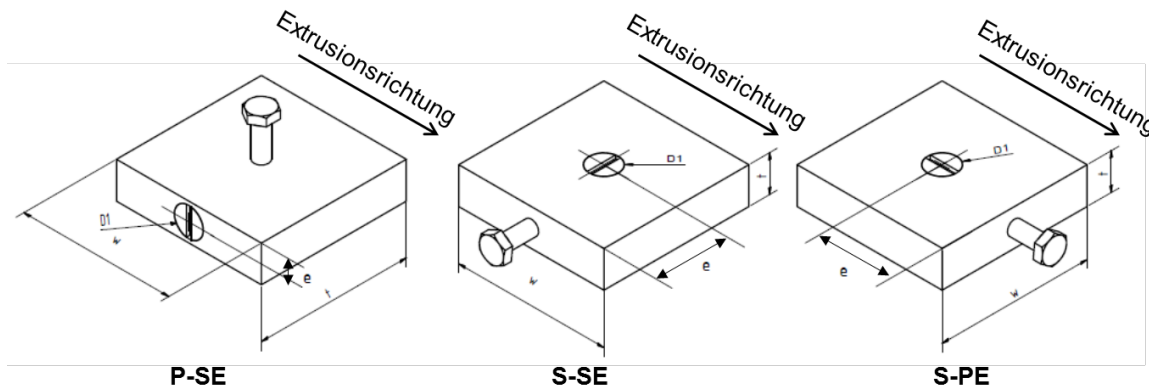


Bild 6.8: Konstruktiv relevante Einschraubrichtungen der QGB-Steckschraubverbindung in plattenförmigen Halbzeugen aus WPC

6.2.1 Bolzendurchmesser D_1 und Eindringtiefe e

Der Einfluss der Kenngrößen Bolzendurchmesser D_1 und Eindringtiefe e wird über die im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte ermittelten maximalen Auszugskraft F_{\max} und der Auszugsfestigkeit beschrieben. Die Auszugsfestigkeit entspricht der auf die projizierte Fläche normierte Auszugskraft F_{ax} . Die Bauteilbreite w wurde in dieser Versuchsreihe mit $w/D_1 = 5$ ausreichend groß gewählt. Die beiden Diagramme in Bild 6.9 stellen die mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit der auf den Bolzendurchmesser D_1 bezogenen Eindringtiefe e für die getesteten Bolzendurchmesser $D_1 = 10$ mm bis 20 mm dar. Dabei kann aufgrund der zunehmenden tragenden Fläche ein stetiger Zuwachs der statischen Auszugskraft mit größeren Bolzendurchmessern D_1 beobachtet werden. Bezogen auf die tragende Fläche erreichen QGB der Durchmesser 10 mm bis 15 mm eine nahezu ähnliche Auszugsfestigkeit, die die des QGB mit $D_1 = 20$ mm um etwa 10 MPa übersteigt. Es ist jedoch festzuhalten, dass die QGB mit dem Durchmesser $D_1 = 10$ mm teilweise durch Abscheren des tragenden Gewindes im Quergewindebolzen versagen.

Die Kurvenverläufe zeigen, dass unabhängig vom Bolzendurchmesser die mechanischen Kennwerte mit größerer Eindringtiefe e bis auf ein Maximum ansteigen und darüberhinaus nahezu unverändert weiter verlaufen. Der konstante Bereich im Kurvenverlauf der Diagramme (Bild 6.9 a, c) geht mit einem zunehmenden Lochleibungsversagen der Proben einher, welches zusätzlich von einem Spaltbruchversagen überlagert ist. Grundsätzlich wurde ein Kombinationsversagen aus Spaltbruch entlang der Schraubachse und Lochleibungsversagen im Bolzengrund beobachtet (Bild 6.9 b, d). Dabei nimmt

der Anteil des Lochleibungsversagens mit zunehmender Eindringtiefe e im Bolzensgrund zu. Bild 6.9 b verdeutlicht am Beispiel des Bolzendurchmessers $D_1 = 10$ mm das dominierende Spaltbruchversagen und das mit größerer Bolzeneindringtiefe e zunehmende Lochleibungsversagen. Das dominierende Spaltbruchversagen ist mit der querschnittsreduzierenden Sacklochbohrung entlang der Schraubachse zu erklären. Der Restquerschnitt der Probe kann dabei die vom Bolzensgrund ausgehende Zugkraft senkrecht zur Schraubachse nicht aufnehmen. Das ausschließliche Lochleibungsversagen trat erst ab e/D_1 -Verhältnissen von größer gleich 3 bzw. 5 auf, welches jedoch nicht mit der maximalen Auszugskraft einhergeht. Die maximale Auszugskraft stellt sich für die QGB der Durchmesser 10 mm bis 15 mm bei einem e/D_1 -Verhältnis von $e/D_1 = 2,5$ ein. Dieses stellt das minimal zulässige e/D_1 -Verhältnis dar. Die größte Auszugsfestigkeit erreichten die QGB mit Außendurchmesser von $D_1 = 10$ und $D_1 = 12$ mm. Da die QGB mit $D_1 = 10$ mm teilweise im Auszugsversuch versagten, ist der Bolzen mit $D_1 = 12$ mm vorzuziehen.

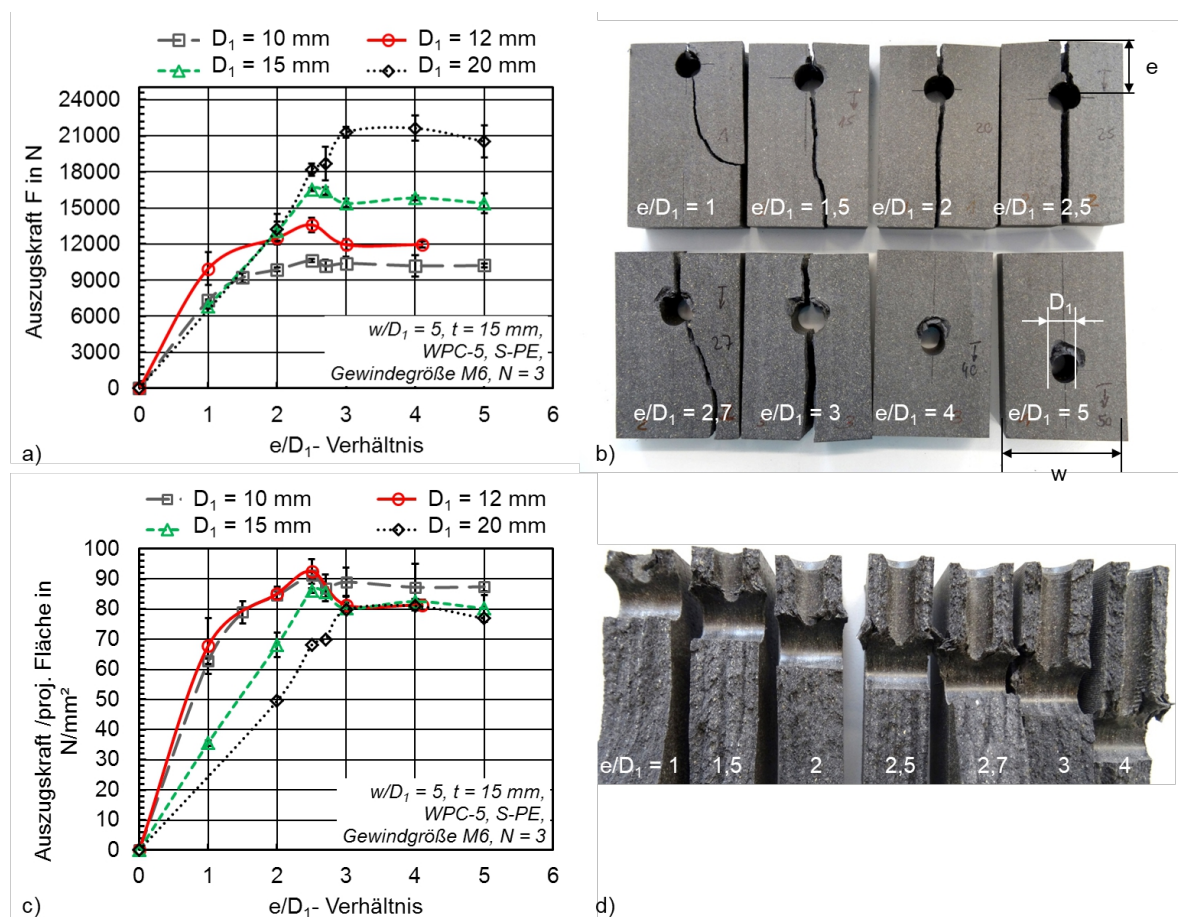


Bild 6.9: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte und Schadensmechanismus in Abhängigkeit des e/D_1 -Verhältnisses, Werkstoff WPC-5, Einschraubrichtung S-PE, Materialfeuchtigkeit = 1,3%, (Ausschnitt aus [Sch18a])

6.2.2 Bauteilbreite w

Die Diagramme in Bild 6.10 stellen sowohl die Auszugskraft als auch die auf die tragende Fläche normierte Auszugskraft der QGB mit den Durchmessern $D_1 = 10$ mm bis $D_1 = 15$ mm in Abhängigkeit des w/D_1 -Verhältnisses dar. Das e/D_1 -Verhältnis wurde ausgehend von der Ergebnislage in Kapitel 6.2.1 auf $e/D_1 = 2,5$ festgelegt.

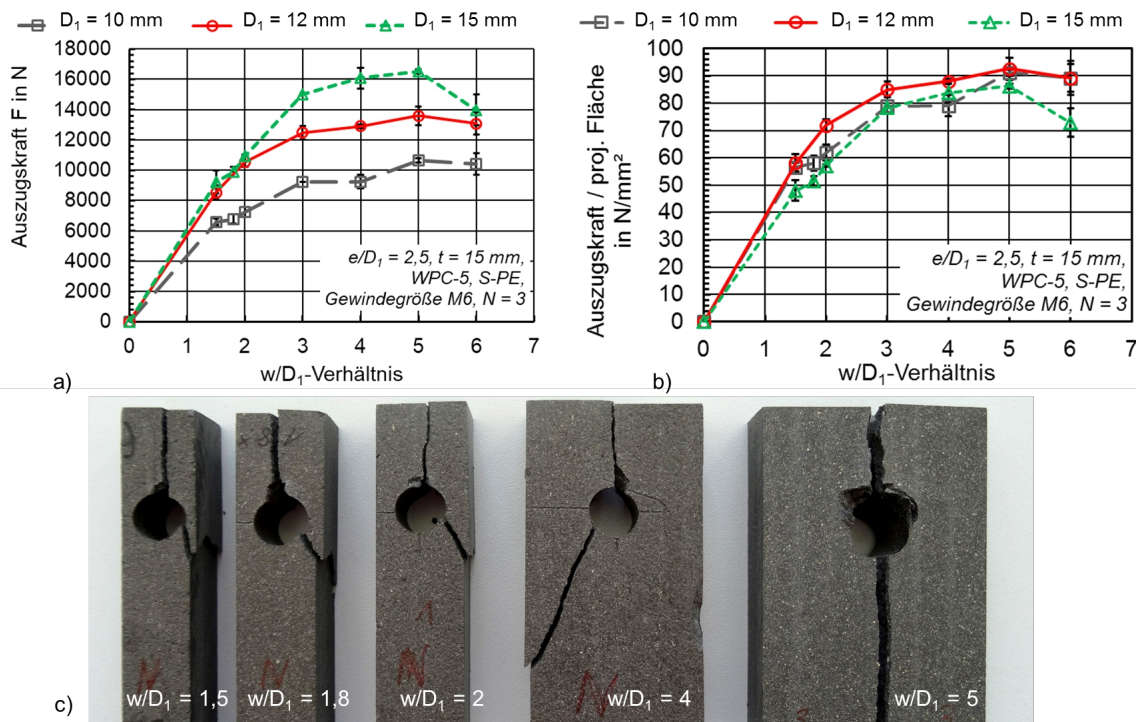


Bild 6.10: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte und Schadensmechanismus in Abhängigkeit des w/D_1 -Verhältnisses, Werkstoff WPC-5, Einschraubrichtung S-PE, Schadensmechanismus für $D_1 = 10$ mm, Materialfeuchtigkeit = 1,3%, [Sch18a, Sch18b]

Die Kurvenverläufe in Bild 6.10 verdeutlichen, dass die mechanischen Kenngrößen unabhängig vom Bolzendurchmesser D_1 mit zunehmender Bauteilbreite w exponentiell bis auf einen Maximalwert ansteigen. Eine erweiterte Aussage lässt sich in Kombination mit dem Versagensbild der im statischen Auszugsversuch getesteten Proben treffen. Am Beispiel des Bolzendurchmessers $D_1 = 10$ mm stellt Bild 6.10 c den Schadensmechanismus mit zunehmender Bauteilbreite w dar. Bis zu einer Bauteilbreite von $w = 40$ mm, respektive dem w/D_1 -Verhältnis = 4, tritt ein Kombinationsversagen aus Spalt- und einseitigem Flankenzugbruch auf. Bei der Bauteilbreite von $w = 50$ ($w/D_1 = 5$), zeigte sich sowohl Lochleibungsversagen als auch Spaltbruchversagen entlang der Schraubachse. Das Spaltbruch-Lochleibungsversagen geht dabei unabhängig vom Bolzendurchmesser bei einem $w/D_1 = 5$ mit den maximalen Auszugskräften einher. Da ab $w/D_1 = 3$ die Auszugskraft bis zu ihrem Maximum bei $w/D_1 = 5$ nur noch einen geringen

Anstieg erfährt ist das Bauteilbreiten-Durchmesserverhältnis im Bereich zwischen $3 \leq w/D_1 \leq 5$ technisch relevant.

6.2.3 Bauteildicke t

Der Einfluss der Bauteildicke t wurde ausschließlich am Bolzendurchmesser $D_1 = 12$ mm durchgeführt, da dieser aus den vorausgegangenen Versuchsreihen als vorteilhafter Bolzendurchmesser D_1 hervorging. Sowohl die auf den Bolzendurchmesser D_1 normierte Eindringtiefe e als auch die Bauteilbreite w wurden entsprechend der Ergebnislage auf die Verhältnisse $e/D_1 = 2,5$ und $w/D_1 = 5$ festgelegt. Die Variation der Bauteildicke t erfolgte an symmetrisch gefrästen Probekörpern aus der Konstruktionsbohle des Materials WPC-5.

Das Diagramm in Bild 6.11 a verdeutlicht sowohl die statische Auszugskraft F_{ax} als auch die auf die projizierte Fläche normierte Auszugskraft der QGB in Abhängigkeit der Bauteildicke t . Die Ergebnisse zeigen, dass die Auszugskraft F_{ax} mit der durch die größere Bauteildicke t einhergehenden Flächenvergrößerung zunimmt. Unabhängig von der Bauteildicke t versagten die Probekörper durch Spaltbruch mit überlagerter Lochleibungsbeanspruchung (Bild 6.11 b). Auffallend ist jedoch, dass die auf die projizierte Fläche bezogene Auszugskraft nicht konstant ist, sondern mit zunehmender Bauteildicke t abnimmt.

Eine mögliche Ursache liegt in der Probekörperpräparation begründet. Da die Probekörper symmetrisch auf die zu untersuchende Bauteildicke t gefräst wurden, liegt die Vermutung nahe, dass die verwendeten Halbzeuge lokal abweichende mechanische Kennwerte über der Bauteildicke t besitzen.

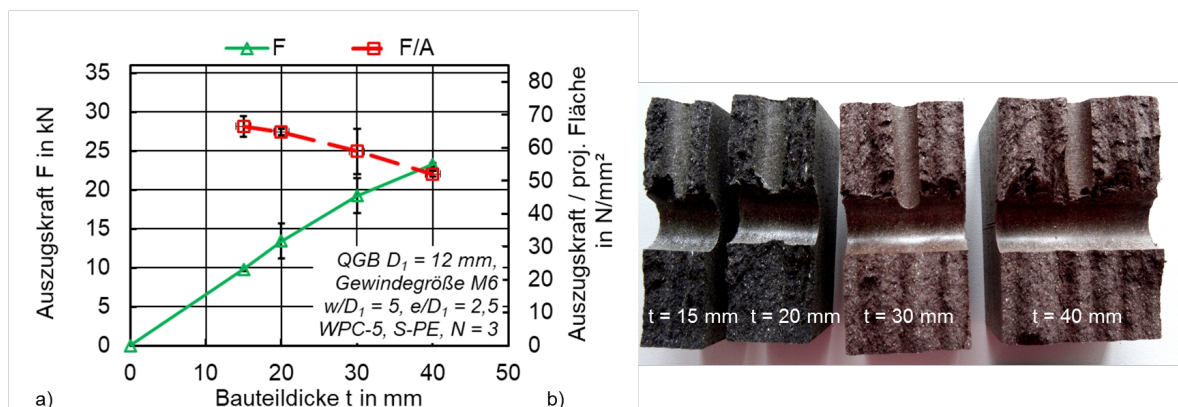


Bild 6.11: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte und Schadensmechanismus in Abhängigkeit der Bauteildicke t , Werkstoff WPC-5 Konstruktionsbohle, Einschraubrichtung S-PE, Materialfeuchtigkeit = 1,3% [Sch18a, Sch18b]

Um dieser Vermutung nachzugehen, wurde ein ergänzender Druckversuch an lokal entnommenen Würfelpuben durchgeführt. Die Würfelpuben mit $a = 15$ mm wurden

sowohl aus dem Kernbereich als auch aus dem Randbereich der Konstruktionsbohle in Scheibenrichtung, parallel zur Extrusionsrichtung entnommen. Die Entnahmestellen sind in der Prinzipskizze (Bild 6.12) gekennzeichnet.

Das Ergebnis der über die Halbzeugdicke lokalen Druckfestigkeiten in Diagramm 6.12 zeigt, dass im mittleren Kernbereich höhere Druckfestigkeiten erreicht werden als im Randbereich. Vermutlich liegt die Ursache in der prozessbedingten 3-Schicht-Füllstofforientierung über die Bauteildicke begründet. Dies lässt den Schluss zu, dass aufgrund des symmetrischen Fräsabtrages die dünneren Probekörper ($t = 15 \text{ mm}$) ausschließlich durch die Kernzone, die dickeren Proben hingegen durch Rand- und Kernschicht gekennzeichnet sind. Dadurch erreichen in dieser Versuchsreihe die in dünneren Probekörper montierten QGB größere Auszugsfestigkeiten als die in dickeren Probekörper montierten QGB.

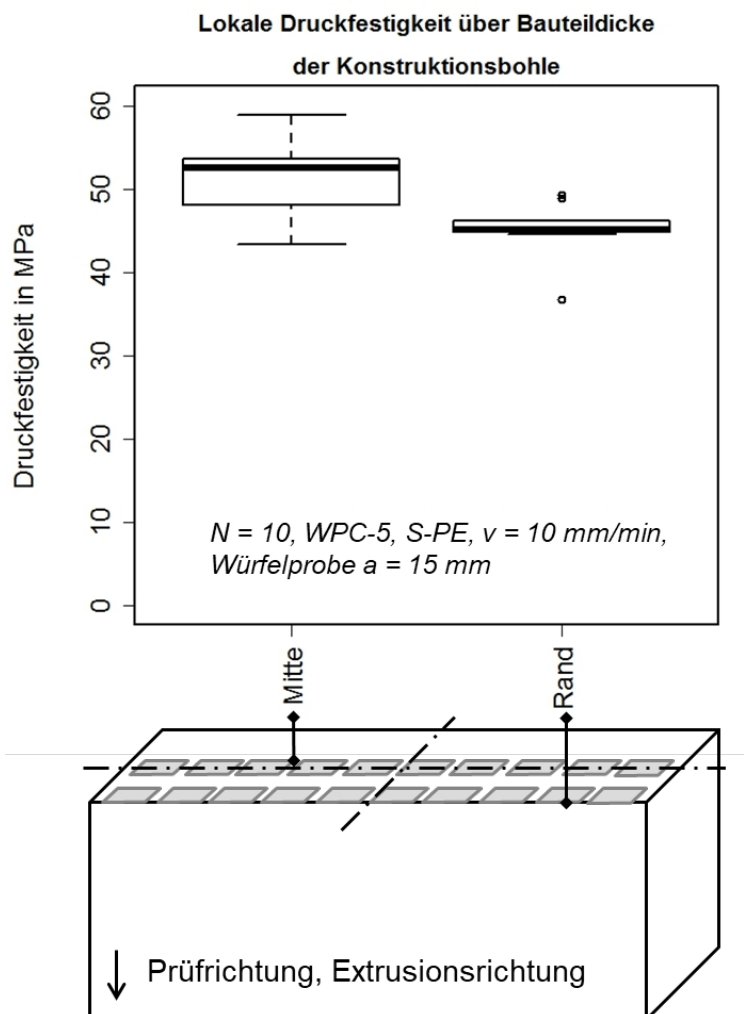


Bild 6.12: Lokale Druckfestigkeit in S-PE Richtung, Konstruktionsbohle WPC-5

6.2.4 Einfluss Holz-Polymer-Werkstoff und Einschraubrichtung

Um die Übertragbarkeit der konstruktiven Parameter auf andere Holz-Polymer-Werkstoffe herauszuarbeiten, wurden ergänzende Auszugsversuche an den Werkstoffen WPC-1 und WPC-6 sowohl senkrecht als auch parallel zur Extrusionsrichtung durchgeführt. Hierfür wurden die konstruktiven Parameter ausgehend von der Ergebnislage vorausgehender Versuche aus Kapitel 6.2 an WPC-5 auf $D_1 = 12 \text{ mm}$ und $w/D_1 = 5$ festgelegt. Das e/D_1 -Verhältnis wurde hingegen für jeden Werkstoff und jede Einschraubrichtung separat variiert.

Die Diagramme in Bild 6.13 a stellen die Auszugskräfte der QGB mit $D_1 = 12 \text{ mm}$ in Abhängigkeit des e/D_1 -Verhältnisses für die untersuchten Werkstoffe und Einschraubrichtungen dar.

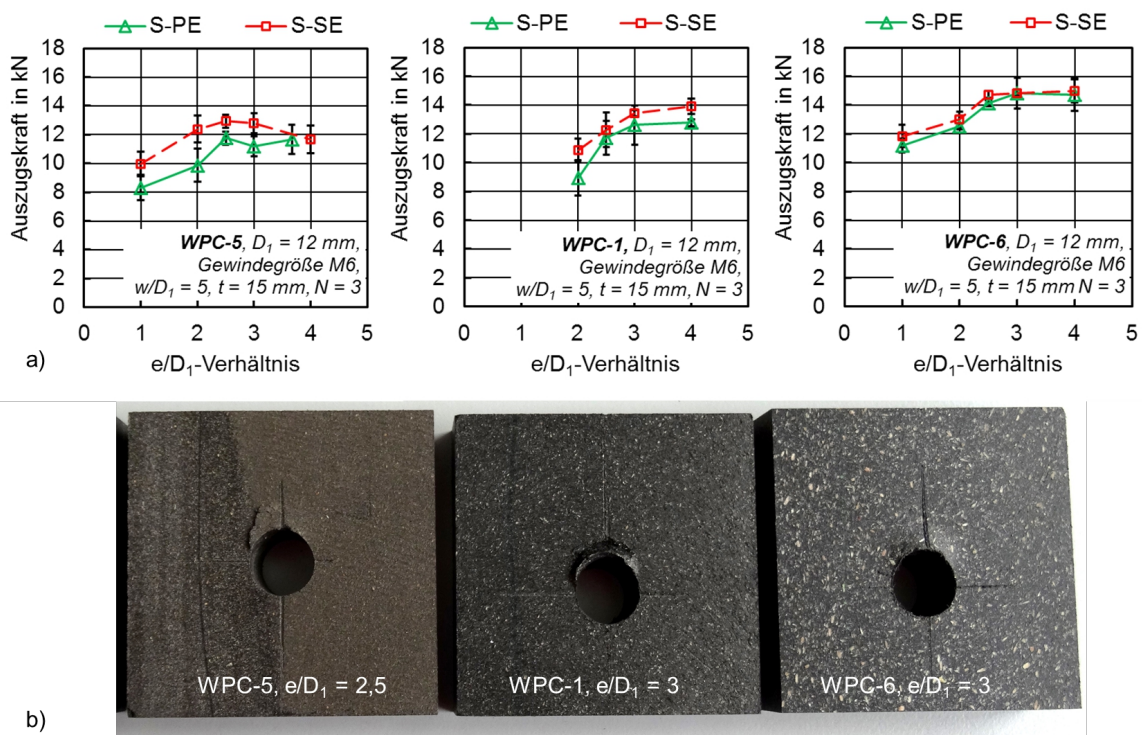


Bild 6.13: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Montageplatte und Schadensmechanismus im Überdrehversuch mit Kopfreibung der Werkstoffe WPC-5, WPC-1, WPC-6, in Abhängigkeit der Einschraubrichtung, Materialfeuchtigkeit = 0,78 % - 1,14% [Sch18a, Sch18b]

Grundsätzlich werden senkrecht zur Extrusionsrichtung größere Auszugskräfte erreicht als parallel zur Extrusionsrichtung. Der quantitative Unterschied beider Einschraubrichtungen schwankt in Abhängigkeit des Werkstoffes zwischen 0,5 kN (WPC-6) und 2 kN (WPC-1). Unabhängig von der Einschraubrichtung liegt ein ähnlicher Kurvenverlauf der Auszugskräfte in Abhängigkeit des e/D_1 -Verhältnisses vor. Das Versagensbild der Versuchswerkstoffe trat im statischen Auszugsversuch bei allen getesteten WPC-Werkstoffen unabhängig von der Einschraubrichtung auf. Es ist durch Lochleibungs-

versagen und überlagertem Spaltbruch entlang der Schraubachse bei geringen e/D_1 -Verhältnissen gekennzeichnet. Wobei der Anteil des Lochleibungsversagens bei Auszug des QGB senkrecht zur Extrusionsrichtung tendenziell häufiger eingetreten ist. Eine erweiterte Aussage lässt sich mittels der in Tabelle 6.1 aufgeführten maximalen Auszugskräften und den entsprechenden e/D_1 -Verhältnissen treffen. Da das Kraftmaximum sowohl senkrecht als auch parallel zur Extrusionsrichtung bei identischem e/D_1 -Verhältnis auftritt, ist die Einschraubrichtung auf die minimale Eindringtiefe der Quergewindebolzen vernachlässigbar. Im Überdrehversuch mit Kopfreibung erreichten die Versuchswerkstoffe in S-PE Richtung teilweise geringere maximale Vorspannkräfte als im statischen Auszugsversuch mit Montageplatte. Dies ist auf die zusätzliche Reib- und Torsionsbeanspruchung sowie unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. Im Überdrehversuch mit Kopfreibung versagten alle Versuchswerkstoffe ebenfalls durch Lochleibungsversagen im Bolzengrund (Bild 6.13 b).

Tabelle 6.1: Maximale Auszugskräfte bei entsprechendem e/D_1 -Verhältnis sowie die Montagekennwerte im Überdrehversuch mit Kopfreibung in Abhängigkeit des Werkstoffes und der Einschraubrichtung

Hersteller	WPC-1		WPC-5		WPC-6	
Richtung	S-SE	S-PE	S-SE	S-PE	S-SE	S-PE
Auszugsversuch mit Montageplatte						
F_{ax} in kN	13,5	12,5	13	11,5	14,5	14
F_{ax} bei e/D_1	3	3	2,5	2,5	3	3
Überdrehversuch mit Kopfreibung, $n = 5$ U/min, Mittelwert aus $N = 5$						
F_{vmax} bei $M_{\dot{U}}$		9,9		11,5		11,7
$M_{\dot{U}}$		18		14,7		21

6.3 Montagetechnische Einflüsse

6.3.1 Montagedrehzahl

Bild 6.14 stellt die Montageparameter Momentendifferenz und maximale Vorspannkraft der Direktverschraubung mit steigender Montagedrehzahlen der Schraube STS plus im Versuchswerkstoff WPC-5 dar. Die leeren Datenpunkte kennzeichnen die Ergebnisse aus der einstufigen Schraubmontage. Einstufig bedeutet, dass für Eindrehen und Anziehen der Schraube die gleiche Montagedrehzahl zugrunde liegt. Es zeigt sich, dass die maximal erreichte Vorspannkraft bei Überdrehen der Schraube ab einer Montagedrehzahl von 200 U/min bis 600 U/min ca. 1 kN abfällt. Dies ist auf den temperaturbedingten Festigkeitsverlust des Grundwerkstoffes bei steigenden Montagedrehzahlen zurückzuführen, welcher bereits aus den Arbeiten von [Dra99], [Tom00] und [Ona82] bekannt ist.

Um den Geschwindigkeitseinfluss auf das Eindrehen und Anziehen der Schraube zu separieren, wurde die zweistufige Schraubmontage hinzugezogen. Dabei erfolgte das Eindrehen der Schraube bis zur Kopfauflage mit $n_E = 600$ U/min und das Anziehen der Schraube mit nur $n_A = 100$ U/min. Die gefüllten Datenpunkte in Bild 6.14 kennzeichnen für diesen Montageablauf die Momentendifferenz und die maximal übertragbare Vorspannkraft.

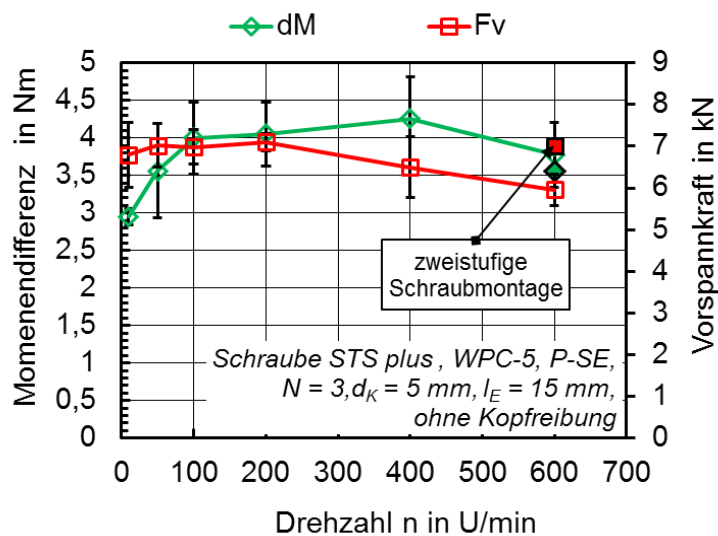


Bild 6.14: Montageparameter im Überdrehversuch bei min. Kopfreibung der Direktverschraubung in Abhängigkeit der Montagedrehzahl, $N = 3$, (leere Symbole = einstufige Schraubmontage, volle Symbole = zweistufige Schraubmontage mit $n_E = 600$ U/min und $n_A = 100$ U/min) [Sch18a].

Es ist ersichtlich, dass mittels zweistufiger Schraubmontage aus hoher Einschraubdrehzahl und geringer Anziehggeschwindigkeit die gleichen maximal übertragbaren Vorspannkraft erreicht werden wie bei der einstufigen Schraubmontage mit 100 U/min.

Der Werkstoff erfährt beim Eindrehen der Schraube mit 600 U/min einen hohen Wärmeeintrag, der die Belastbarkeit der Schraubverbindung zunächst reduziert. Durch die langsamere Anziehdrehzahl der Schraube hat der Werkstoff jedoch mehr Zeit die initiierte Reibwärme über die Metallschraube abzuführen, sodass trotz des hohen Wärmeeintrages die vollständige Belastbarkeit beim Anziehen der Schraube gegeben ist. Damit ermöglicht die Drehzahlmodifikation aus schnellem Eindrehen und langsamem Anziehen der Schraube, neben genauen Anzugmomenten, eine geringe Fügezeit bei gleichzeitig voller Belastbarkeit der Schraubverbindung.

In Bild 6.15 ist der relative Vorspannkraftabfall der Direktverschraubung und der QGB-Steckschraubverbindung direkt nach Abschalten der Schraubspindel in Abhängigkeit der Montagedrehzahlen 5 U/min, 50 U/min und 100 U/min dargestellt.

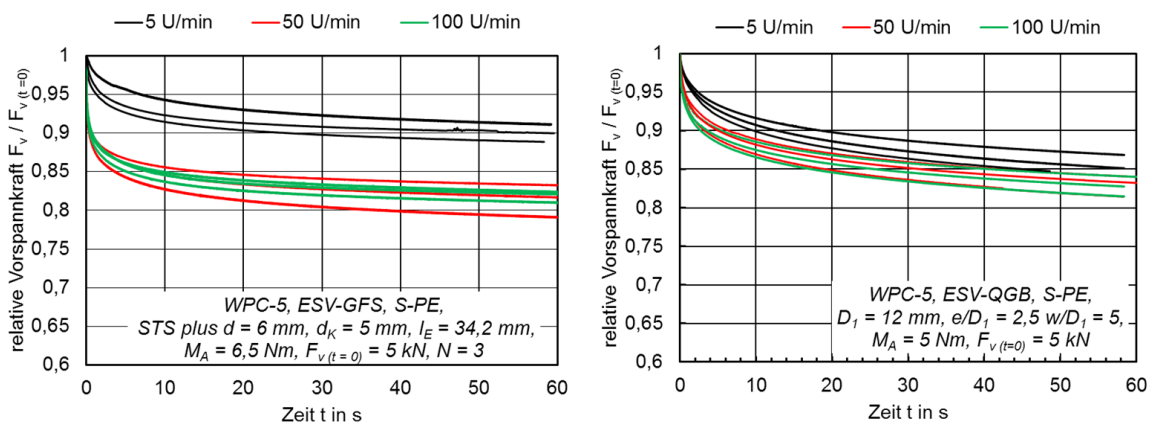


Bild 6.15: Relativer Vorspannkraftverlauf direkt nach Abschalten der Schraubspindel bei Montagedrehzahlen zwischen 5 - 100 U/min der Direktverschraubung (links) und QGB-Steckschraubverbindung (rechts), drehmomentengeregeltes Anziehverfahren

Für beide Schraubverbindungen zeigt sich, dass bereits nach wenigen Sekunden nach Montagestopp die Vorspannkraft der mit 50 U/min und 100 U/min angezogenen Schraubverbindungen stärker abfällt als mit 5 U/min. Dabei ändert sich die Relaxationsgeschwindigkeit bis etwa 10 s nach Montagestopp bei hohen Anzugdrehzahlen n_A stärker als bei 5 U/min. Dies ist durch einen steileren Abfall der Relaxationskurven in Bild 6.15 rechts ersichtlich. Grundsätzlich verringert ein langsames Anziehen der Schraubverbindung die Vorspannkraftrelaxation direkt nach Montagestopp. Dieser Effekt ist bei den Direktverschraubungen deutlich ausgeprägter als bei der QGB-Steckschraubverbindung. Ein Unterschied in den relativen Vorspannkraftverläufen der mit 50 U/min und 100 U/min montierten Schraubverbindungen ist nicht ersichtlich. Die Kurvenverläufe beider Drehzahlen liegen in einem gemeinsamen Streubereich.

Das drehzahlabhängige Relaxationsverhalten ist auf die gegenläufigen Effekte der festigkeitsmindernden Friktionswärme und der geschwindigkeitsabhängigen Steifigkeit des Werkstoffes zurückzuführen [Tom00]. Je höher die Drehzahl, umso größer ist die Belastungsgeschwindigkeit des Kunststoffes, welches durch ein steiferes Material-

verhalten eine geringere Relaxationsneigung nach sich zieht. Gleichzeitig wird durch eine größere Drehzahl mehr Wärmeenergie initiiert, welches eine stärkere Relaxationsneigung zur Folge hat. Je nach Drehzahl, Werkstoffsteifigkeit und thermischen Eigenschaften des Kunststoffes überlagern sich die gegenläufigen Effekte [Tom00]. Die erhaltenen Kurvenverläufe reihen sich zu diesem Sachverhalt mit ein. Wobei die Vorspannkraftverläufe bei 50 U/min und 100 U/min womöglich eine Kompensation aus beiden Effekten erfahren. Bei 5 U/min ist die geringe Wärmeinitiiierung bzw. hohe Wärmeableitung in die Schraube maßgeblich.

6.3.2 Nachziehen der Schraubverbindung

Aus den bisherigen Untersuchungen zu Kunststoffdirektverschraubungen und Bolzenverbindungen im Holzbau ist bekannt, dass die Restvorspannkraft durch mehrmaliges Nachziehen der Schraubverbindung gesteigert werden kann. Dabei wird jedoch nicht offen gelegt wie oft das Nachziehen bei verschiedenen Schraubverbindungen und Werkstoffe zu erfolgen hat. Das Ziel dieser Versuchsreihe besteht nun darin, die quantitative Wirkung des Nachziehens auf die Relaxationsgeschwindigkeit und die Restvorspannkrafthöhe beider Einschraubverbindungen herauszuarbeiten und eine technisch sinnvolle Anzahl der Nachziehintervalle bei unterschiedlichen Montagevorspannkraften zu ermitteln.

In Bild 6.16 sind für beide Einschraubverbindungen die Vorspannkraftverläufe der ersten 8 Minuten mit mehrmaligem Nachziehen auf die Anfangsvorspannkraft von 8 kN dargestellt. Beide Schraubverbindungen wurden im Versuchswerkstoff WPC-5 mit den konstruktiven Parametern aus Tabelle 5.4 so montiert, dass eine einheitliche Verankerungsfläche zugrunde liegt. Für beide Einschraubverbindungen ist zu erkennen, dass mit Hilfe des Nachziehens der Schraubverbindung eine Verringerung der Relaxationsgeschwindigkeit und damit eine höhere Restvorspannkraft erreicht werden kann. Aus den Diagrammen in Bild 6.16 ist ersichtlich, dass mit jedem weiteren Nachziehen der Schraubverbindung auf die Anfangsvorspannkraft die Relaxationsgeschwindigkeit innerhalb eines Nachziehintervalles stetig abnimmt. Ein sehr großer Effekt stellt sich bereits nach dem ersten Nachziehen der Schraubverbindung ein. Theoretisch könnte der Nachziehvorgang so oft wiederholt werden bis die Relaxationsgeschwindigkeit innerhalb eines Intervalls nahe Null liegt bzw. keine Änderung der Relaxationsgeschwindigkeit innerhalb zwei aufeinanderfolgender Nachziehintervalle mehr messbar ist. Die Dauer der Versuche zeigt bereits, dass dieses Vorgehen aus wirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar ist. Aus diesem Grund wurde der gesamte Nachziehvorgang auf maximal eine Stunde begrenzt. Hierfür wurde die Relaxationsgeschwindigkeit auf einen Schwellwert von 0,5 N/s festgelegt. Bei Unterschreiten dieses Schwellenwertes wurde die Schraubverbindung kein weiteres Mal nachgezogen.

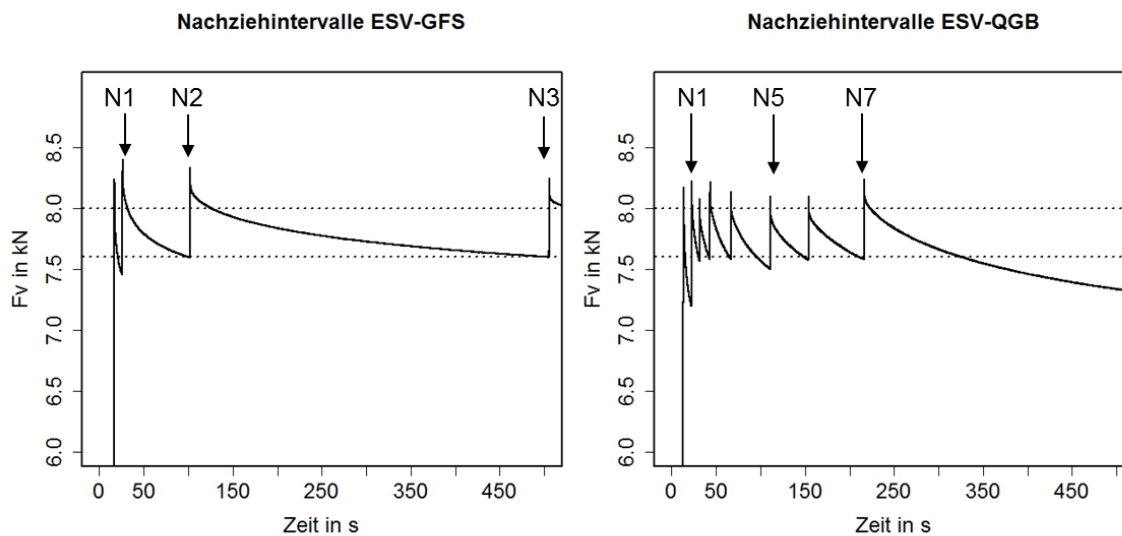


Bild 6.16: Absolute Vorspannkraftrelaxation in den Nachziehintervallen und Zeitpunkt des Nachziehens der Schraubverbindungen

Die im letzten Nachziehintervall erreichte Relaxationsgeschwindigkeit beider Schraubverbindungen ist in Abhängigkeit von der Montagevorspannkraft in Bild 6.17. dargestellt. Tabelle 6.2 ergänzt die dazugehörigen Mittelwerte und die Anzahl der durchgeführten Nachziehintervalle. Aus Tabelle 6.2 wird ersichtlich, dass die Anzahl der Nachziehintervalle bei beiden Verbindungen mit steigender Montagevorspannkraft zunimmt. Die Nachziehintervalle bei Direktverschraubungen sind bei den Vorspannkraften von 6 bis 9 kN einheitlich auf 2 bis 3 begrenzt. Die durch das Nachziehen erreichten Relaxationsgeschwindigkeiten der Direktverschraubung liegen unabhängig von der Montagevorspannkraft im Mittel bei 0,25 N/s in ein und demselben Streubereich, sodass die durch das Nachziehen erreichte Relaxationsgeschwindigkeit scheinbar unabhängig von der Montagevorspannkraft ist. Das würde bedeuten, dass mit Hilfe des Nachziehens eine auf 9 kN vorgespannte Schraubverbindung genauso stark relaxiert, wie eine Schraubverbindung die mit einer geringen Vorspannkraft angezogen wurde. Dem gegenüber gestellt zeigen die Nachziehversuche der Direktverschraubung in unverstärktem PE-HD einen zunehmenden Anstieg der Relaxationsgeschwindigkeit und notwendigen Nachziehintervalle mit größeren Montagevorspannkraften. Damit unterscheiden sich die Direktverschraubungen in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen grundsätzlich von Direktverschraubungen in unverstärkten Thermoplasten. Ob sich die scheinbar belastungsunabhängige Relaxationsgeschwindigkeit von Direktverschraubungen in WPC mit fortschreitender Versuchszeit aufhebt, wird im Rahmen des Langzeitrelaxationsversuches in Kapitel 6.5.4 untersucht.

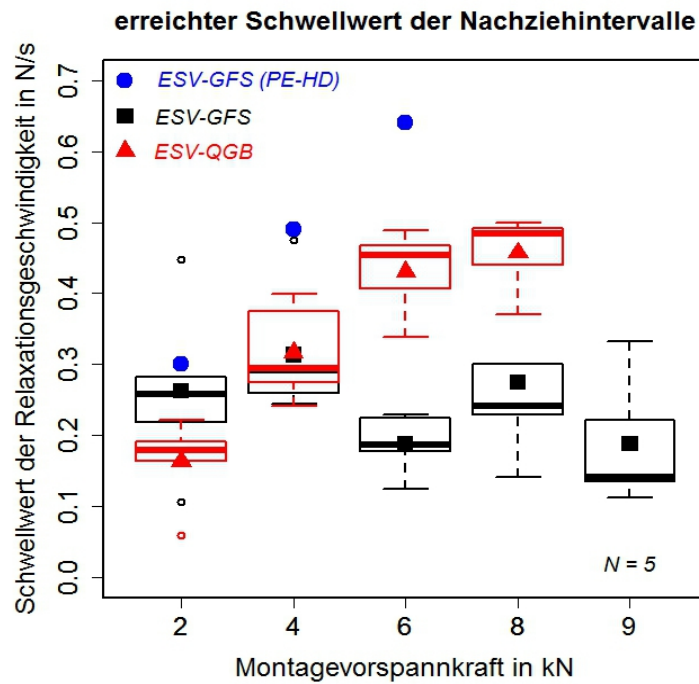


Bild 6.17: Schwellwert der Relaxationsgeschwindigkeit im jeweils letzten Nachziehintervall, $N = 5$, volle Symbole = Mittelwerte

Tabelle 6.2: Anzahl des Nachziehens und Mittelwerte der Relaxationsgeschwindigkeit im jeweils letzten Nachziehintervall

Schraubverbindung	F_v in kN	Relaxationsgeschwindigkeit (Schwellwert) in N/s	Anzahl der Nachziehintervalle
ESV-GFS	2	0,263	0 - 1
	4	0,313	1 - 2
	6	0,188	2 - 3
	8	0,275	2 - 3
	9	0,188	2 - 3
ESV-GFS (PE-HD)	2	0,3	4
	4	0,49	7
	6	0,64	16
ESV-QGB	2	0,163	1 - 4
	4	0,317	2 - 5
	6	0,431	4 - 7
	8	0,457	5 - 8

Für die QGB-Steckschraubverbindung nimmt die Anzahl der Nachziehintervalle und die Relaxationsgeschwindigkeit mit zunehmender Montagevorspannkraft stetig zu. Sie kann

bei QGB-Steckschraubverbindungen durch das mehrmalige Nachziehen nur wenig verlangsamt werden.

Der Vergleich beider Schraubverbindungen verdeutlicht, dass die QGB-Steckschraubverbindung zum einen schneller relaxiert und zum anderen eine größere Nachziehanzahl erfordert bis der gewünschte Effekt der Restvorspannkrafterhöhung eintritt. Beispielsweise müssen QGB-Steckschraubverbindungen mit 6 kN im Vergleich zu Direktverschraubungen doppelt so oft nachgezogen werden, um den festgelegten Schwellwert der Relaxationsgeschwindigkeit zu unterschreiten. Die QGB-Steckschraubverbindung relaxiert im Vergleich zur Direktverschraubung doppelt so schnell.

Um die Ursache der geringeren Vorspannkraftrelaxation von nachgezogenen Direktverschraubungen in Holz-Polymer-Werkstoffen zu klären, wird nachfolgend der Gewindeeingriff mit Hilfe der Auflichtmikroskopie analysiert. Bild 6.18 stellt die mit Hilfe der Auflichtmikroskopie vermessene Verankerungslänge L_{VF} entlang einer Flanke sowie den Materialabfluss und die poröse Holzfasersammlung im Flankenzwischenraum dar.

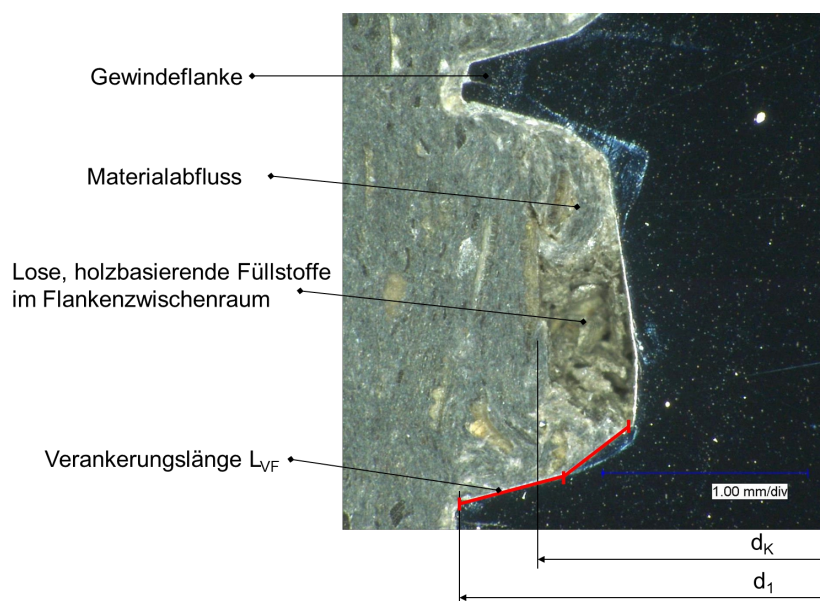


Bild 6.18: Lichtmikroskopie des Gewindeeingriffs der Schraube für Thermoplaste (Schriefer STS plus) in WPC-5. $d_1 = 6 \text{ mm}$, $d_k = 5 \text{ mm}$, $l_E = 34,2 \text{ mm}$, $F_v = 2 \text{ kN}$ ohne Nachzug (Vergrößerung 100x)

Beim Nachziehen der gewindeformenden Schraube auf die jeweilige Anfangsvorspannkraft furcht sich die Gewindeflanke tiefer in das Material ein. Dabei fließt das Material entlang der Gewindeflanke in den Flankenzwischenraum. Beim Materialabfluss entlang der Gewindeflanke werden teilweise die biegesteifen holzbasierenden Füllstoffe aus dem Werkstoffgefüge ausgerissen. Diese sammeln sich als lose Späne im Flankenzwischenraum an. Bild 6.19 stellt die Gewindeeingriffe nachgezogener und nicht nachgezogener Direktverschraubungen sowohl für eine geringe als auch hohe Vorspannkraft gegenüber. Es zeigt sich, dass durch das mehrmalige Nachziehen weiteres Material in den Flankenzwischenraum geschoben wird, welches die losen Holzspäne

komprimiert. Damit vergrößert sich zum Einen die Verankerungsfläche an der Gewindeflanke und das Werkstoffvolumen im Flankenzwischenraum, zum Anderen wird durch die Holzfaseransammlung im Flankenzwischenraum der Holzanteil lokal erhöht und der Thermoplastanteil reduziert. Geht man von der Vermutung aus, dass PE-HD als Matrixmaterial ein ausgeprägteres viskoelastisches Materialverhalten besitzt als Weichholz, so wirkt die lokale und verdichtete Holzfaseransammlung dem Vorspannkraftabfall entgegen. Sowohl die Formschlussvergrößerung durch eine größere Flankenüberdeckung als auch die lokale Holzfaseransammlung im Flankenzwischenraum treten unabhängig von der Montagevorspannkraft bei jedem Nachziehen auf. Voraussetzung dieser Methode ist, dass das Anzugmoment im Arbeitsbereich der Schraube liegt und die Verbindung nicht überdreht wird.

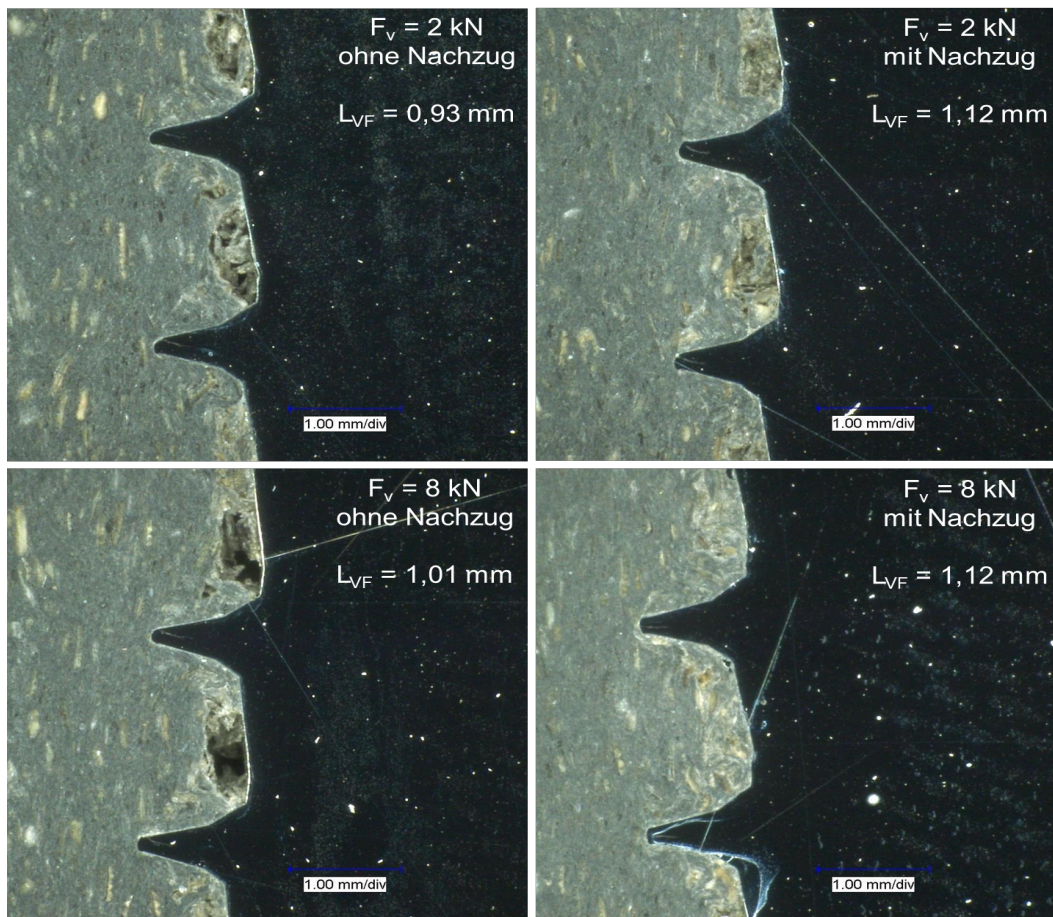


Bild 6.19: Auflichtmikroskopie der Direktverschraubung in WPC-5 mit $F_v = 2 \text{ kN}$ (oben) und $F_v = 8 \text{ kN}$ (unten) ohne Schraubennachzug (links) und mit Schraubennachzug (rechts), Schraube STSplus $d_1 = 6 \text{ mm}$, $d_k = 5 \text{ mm}$, $l_E = 34,2 \text{ mm}$, Vergrößerung 50x. Mittelwert L_{VF} aus je 28 Einzelmessungen

6.4 Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf den Montageprozess

6.4.1 Einführung

Die Materiallagerung unterliegt im Praxisfall den unterschiedlichsten Klimaszenarien, die unter Berücksichtigung der Lagerungsdauer direkten Einfluss auf die Materialfeuchtigkeit nehmen. Es ist in produktionsfrisches Material, das nach der Extrusion den darrtrockenen Zustand aufweist, und Lagermaterial, welches unterschiedlichen Klimaszenarien ausgesetzt ist, zu unterscheiden. Im ungünstigsten Fall verweilt das Material über einen längeren Zeitraum im Baumarktaußenbereich, bevor es montiert wird und ist damit jeglichen äußeren klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Für maschinenbautechnische Anwendungen wäre diese Materiallagerung grob fahrlässig. Hierbei ist darrtrockenes, produktionsfrisches Material, das den Klimaszenarien Holznormklima (20 °C, 65% rel. LF) und den Klimaschwankungen in Produktionsstätten [Mue15] unterliegt, relevant. Die Extremkonditionierung soll sowohl die für den Maschinenbau relevanten Klimaszenarien mit einschließen, als auch den langsamen Sorptionsmechanismus im Material beschleunigen. In dieser Versuchsreihe steht die Fragestellung im Fokus, ob und in welchem Umfang sich ein technisch relevanter Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter einstellt. Dieser Einfluss wird hauptsächlich an dem Material WPC-5 charakterisiert. Hierfür wurden die Montageparameter für die Direktverschraubung und der Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung aus der Tabelle 5.4 zugrundegelegt. Es gilt zu beachten, dass die gesamte Außenkontur des Materials spanend bearbeitet worden ist und damit die äußere geschlossene Extrusionsschicht abgetragen wurde. Daraus resultiert ein schnellerer Sorptionsmechanismus im Vergleich zu unbearbeitetem WPC-Material mit geschlossener Außenschicht.

6.4.2 Sorptionsverhalten der WPC-Werkstoffe

Zur Charakterisierung der Wasserabsorption in das WPC-Material wurde, neben der Materialfeuchtigkeit und den dreidimensionalen Quellmaßen, die lokale Sorptionstiefe ermittelt. Das Diagramm in Bild 6.20 stellt den Feuchtegehalt der Testwerkstoffe WPC-1, WPC-5 und WPC-6 während der neunmonatigen Kaltwasserlagerung dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass alle 15 mm dicken Testwerkstoffe selbst nach einem dreiviertel Jahr noch keine Ausgleichsfeuchte besitzen. Daher ist bei allen nachfolgenden Versuchsergebnissen zu berücksichtigen, dass die Testwerkstoffe nie die Sättigungsfeuchte erreichten. Aus diesem Grund wird die optische Analyse der Wassersorptionsfront am Querschnitt der Proben in die Analytik eingebunden.

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass trotz des höchsten Holzfaseranteils (ca. 70 Gew.-%) der Werkstoff WPC-5 den geringsten Feuchtegehalt und damit die geringste Wasseraufnahme während der gesamten Kaltwasserlagerung besitzt. Dieses Merkmal

lässt gleichzeitig auf eine qualitativ hochwertige Werkstoffverarbeitung schließen. Der Feuchtegehalt aller Testwerkstoffe liegt nach 28-tägiger Kaltwasserlagerung bei 4% - 7% und erfüllt damit die im Gütesiegel definierten Forderungen, wobei der Testwerkstoff WPC-6 den Grenzmittelwert tangiert. Aufgrund der ermittelten Feuchtegehalte wird für die weitere Charakterisierung ausschließlich der Testwerkstoff WPC-5 verwendet.

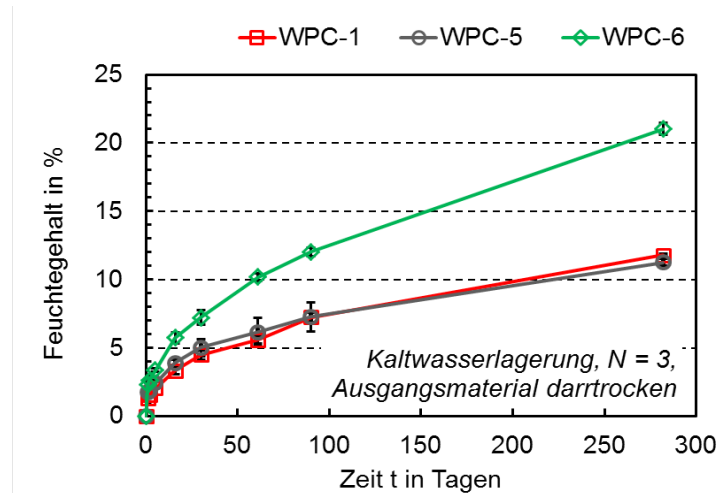


Bild 6.20: Feuchtegehalt der Testwerkstoffe während der Kaltwasserlagerung über 9 Monate

Die Darstellung des makroskopischen Sorptionsbereiches und der Messwerte zeigen Bild 6.21 und Tabelle 6.3. Der Sorptionsbereich ist durch eine deutlich dunklere Farb-
abgrenzung zum umliegenden Probenmaterial erkennbar. Zur besseren Darstellung der Farbabgrenzung wurde nachträglich die weiße Grenzlinie eingezeichnet. Sie kennzeichnet die Grenze des Sorptionsbereiches. Um den lokal abweichenden Feuchtegehalt über den Querschnitt nachzuweisen, wurde die Feuchtebestimmung nach Karl Fischer hinzugezogen. Die Entnahmestellen der Proben sind in Bild 6.21 gekennzeichnet.

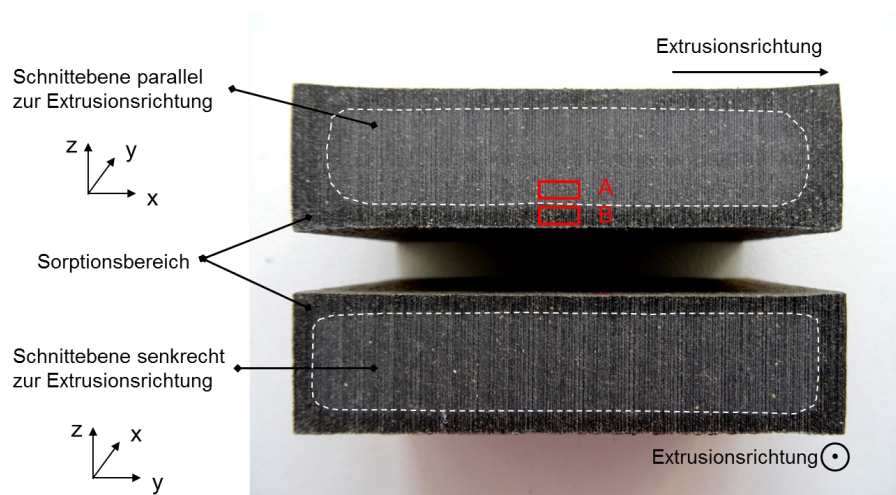


Bild 6.21: Sorptionsbereich des Materials WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung senkrecht und parallel zur Extrusionsrichtung, Probengröße 60 x 60 x 15 mm, Rechtecke kennzeichnen Probenentnahme für Feuchtebestimmung nach Karl Fischer

Die Feuchtebestimmung nach Karl Fischer belegte mit einem Feuchtegehalt von ca. 16% im Randbereich (Position B) und ca. 1% im inneren Bereich (Position A) die Abgrenzung des Wassersorptionsbereiches in der Probe. In Tabelle 6.3 sind die Quellmaße α_Q und die Sorptionstiefe nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung des Materials WPC-5 zusammengefasst. Alle Proben zeigten während der Kaltwasserlagerung eine zunehmende Kantenquellung. Diese liegt je nach Bauteilrichtung bei 0,6% bis 6,2%. Die größte Quellneigung ist in Dickenrichtung (z) zu verzeichnen.

Die Werte der lokalen Sorptionstiefe in den drei Hauptrichtungen aus Tabelle 6.3 zeigen das anisotrope Sorptionsverhalten auf, welches in Längsrichtung, entsprechend parallel zur Extrusionsrichtung am stärksten ausgeprägt ist. Je nach Richtung liegt die Sorptionstiefe nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung bei 2,3 mm - 3,8 mm. Bezogen auf die Lagerungsdauer lässt sich die Sorptionsgeschwindigkeit auf maximal 0,3 mm pro Woche ableiten. Die sich mit der Lagerungsdauer ändernde Diffusionsgeschwindigkeit wird hierbei vernachlässigt, sodass die Angabe der Sorptionsgeschwindigkeit fehlerbehaftet ist. Des Weiteren wird deutlich, dass die Sorptionswerte nicht mit den Quellmaßen einhergehen. Das bedeutet, dass in Längsrichtung (parallel zur Extrusionsrichtung) zwar die größte Sorptionstiefe vorliegt aber die Quellneigung am geringsten ist. Vermutlich spielt die Füllstofforientierung und das anisotrope Quellverhalten der Holzspäne dabei die entscheidende Rolle.

Tabelle 6.3: Richtungsabhängige Quellung, Sorptionstiefe und Sorptionsrate WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung, $N = 9$, Feuchtegehalt = 7,25%

Richtung	Quellmaß α_Q [%]	Sorptionstiefe [mm]	Sorptionsgeschwindigkeit [mm/Woche]
Längsrichtung (x)	0,55	3,8	0,3
Breitenrichtung (y)	1,03	3,1	0,25
Dickenrichtung (z)	6,23	2,3	0,18

Ob und in welchem Umfang die Wasserabsorption des Materials Einfluss auf die Montageparameter und die Verbindungseigenschaften der Schraubverbindungen hat, ist in den Kapiteln 6.4.3 für die Direktverschraubung und in Kapitel 6.4.4 für die QGB-Steckschraubverbindung dargestellt.

6.4.3 Direktverschraubung

Bild 6.22 stellt den Einfluss unterschiedlicher Lagerungsbedingungen und den damit variierten Feuchtegehalt auf die Montageparameter Eindrehmoment, Überdrehmoment, Momentendifferenz und maximal übertragbarer Vorspannkraft der Direktverschraubungen dar. Es wird hierbei noch unterschieden, ob das Bohren der Einschraubstelle vor bzw. nach der Kaltwasserlagerung stattfindet.

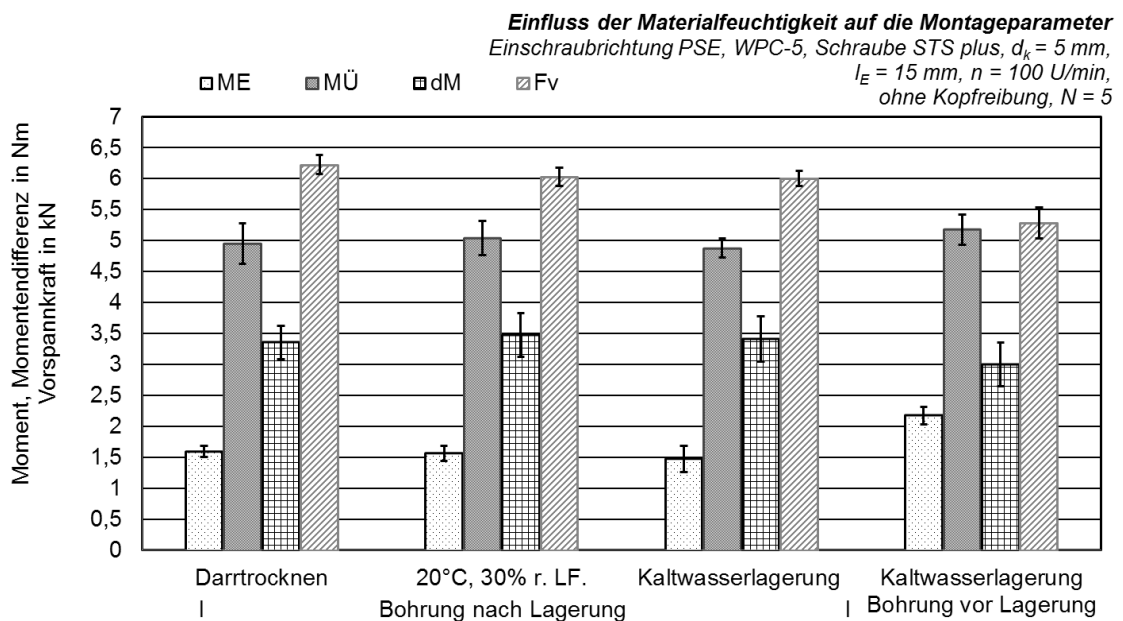


Bild 6.22: Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter der Direktverschraubung, abgebildet durch die Konditionierung bei 103 °C (darrtrocken), bei Raumklima (20°C, 30% rel. LF) und unter Kaltwasserlagerung, Konditionierungsdauer = 90 Tage. Materialfeuchtigkeit darrtrocken = 0%, Raumklima = 1,2%, Kaltwasserlagerung = 7,25% [Sch18a].

Findet das Bohren der Verbindungsstelle nach allen durchgeführten Auslagerungen statt, treten nahezu keine Unterschiede in den Montageparametern auf. Ein marginaler Einfluss wird im Überdrehmoment und der Vorspannkraft ersichtlich, die im darrtrockenen Material geringfügig höhere Werte erreichen. Dem gegenüber gestellt, zeigen die vor der Kaltwasserlagerung gebohrten Proben größere Eindrehmomente, geringfügig höhere Überdrehmomente jedoch auch eine geringere Vorspannkraft und Momentendifferenz auf. Die geringere Momentendifferenz ist auf das größere Eindrehmoment zurückzuführen. Die Gründe hierfür sind im Quellverhalten der Einschraubstelle zu sehen, da der Kernlochdurchmesser nach der Kaltwasserlagerung anisotrop um 0,1 mm bis 0,3 mm kleiner geworden ist. Damit steigt das Eindrehmoment (Gewindeformmoment) durch das größere zu verdrängende Volumen an. Hinsichtlich des fast unveränderten Überdrehmomentes überlagern sich die Effekte der geringeren mechanischen Belastbarkeit des Materials infolge der größeren Materialfeuchtigkeit und der durch die Quellneigung

vergrößerten Verankerungsfläche. Am deutlichsten bestätigt die um fast 1 kN geringere Vorspannkraft die geringere Belastbarkeit infolge der Wasseraufnahme des Materials. Unter Berücksichtigung der Einschraubrichtung in Bild 6.23 wird deutlich, dass in Scheibenrichtung parallel zur Extrusion (S-PE) der größte Vorspannkraftverlust infolge der Wasserauslagerung zu verzeichnen ist. Die Differenz aus der mittleren Vorspannkraft des bei 20 °C, 30% rel. LF konditionierten Materials und der mittleren Vorspannkraft der über 90 Tage im Kaltwasser konditionierten Proben liegt bei 27%.

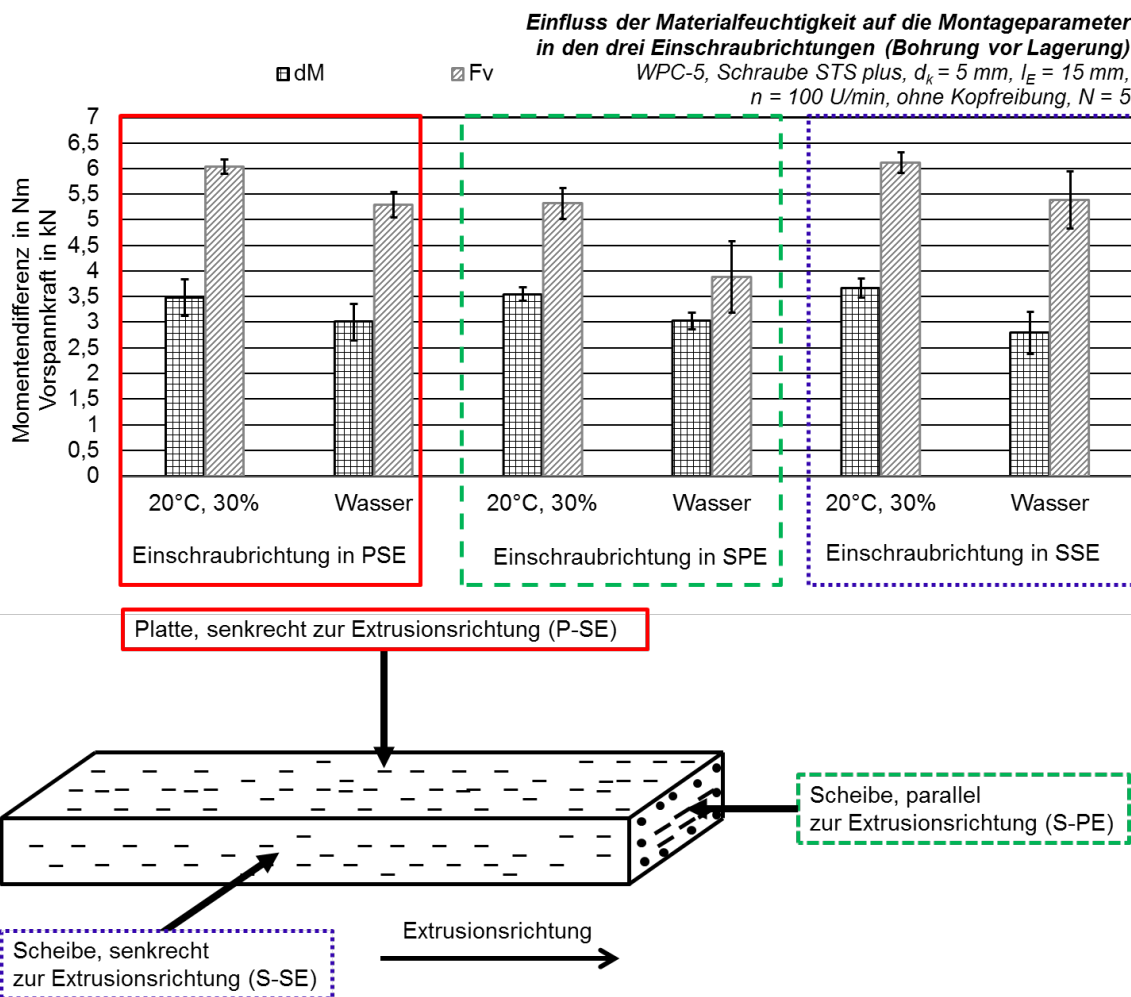


Bild 6.23: Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter der Direktverschraubung in den drei Einschraubrichtungen. Bohrung der Proben vor Lagerung. Konditionierungsdauer = 90 Tage. Materialfeuchtigkeit der Proben im Raumklima (20 °C, 30% rel. LF) = 1,2% und nach der Kaltwasserlagerung = 7,25%.

Die Querschnittsaufnahme der im Überdrehversuch getesteten Direktverschraubung in Bild 6.24 zeigt den Sorptionsbereich des Wassers nach 90 Tagen Kaltwasserlagerung. Die obere Probe wurde nach der Kaltwasserlagerung und die untere Probe vor der Lagerung mit $d_k = 5 \text{ mm}$ gebohrt. Die Schnittebene der Probe liegt in der Extrusionsrichtung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gewindeformende Schraube, der nach der

Kaltwasserlagerung gebohrten Probe, nur zu einem geringen Anteil im Sorptionsbereich liegt. Bei der Probe, die vor der Kaltwasserlagerung gebohrt wurde, ist die Schraube hingegen vollständig vom Wassersorptionsbereich eingeschlossen.

Anhand der Änderung der Montagekennwerte der Direktverschraubung und des Wassersorptionsbereiches im Material wird deutlich, dass die Verringerung der maximal übertragbaren Vorspannkraft mit der direkten Anwesenheit des Wassers in der Verbindungsstelle einhergeht. Der Sorptionsbereich besitzt je nach Einschraubrichtung eine Tiefe von 2,3 mm bis 3,8 mm. Damit dieser Effekt auf die Direktverschraubung Einfluss nehmen kann, muss die Verbindungsstelle direkten Wasser- bzw. Luftfeuchtigkeitskontakt besitzen. Das ist ausschließlich für Strukturprofile mit extrudierter Einschraubstelle relevant. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die anwesende äußere Extrusionschicht die Sorptionsneigung nochmals verlangsamt [Bur11, Che10].

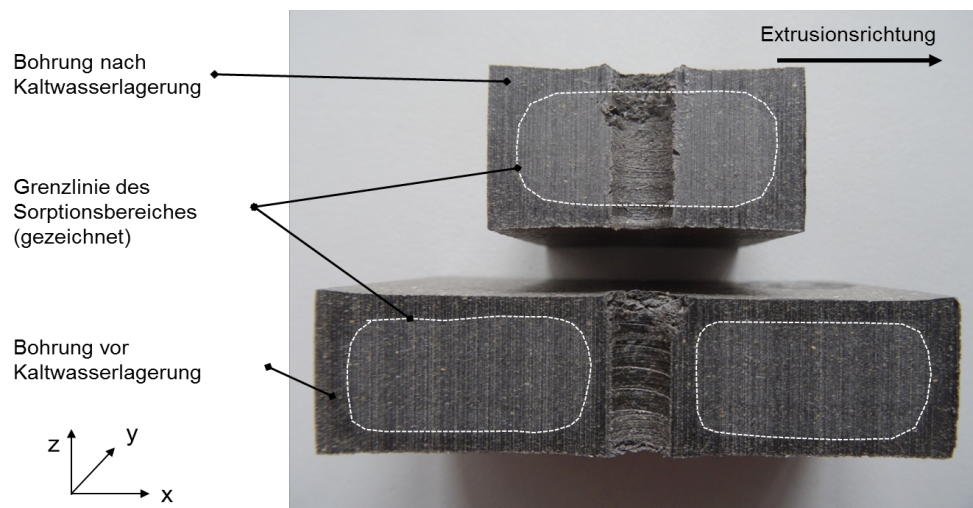


Bild 6.24: Sorptionsbereich der im Überdrehversuch versagten Proben des Materials WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung (Einschraubrichtung P-SE Richtung, Sichtebene entspricht S-SE Richtung bzw. Längsrichtung)

Bei dem getesteten Vollmaterial beeinflusst die Materialfeuchtigkeit kaum die Montagekenngrößen, da die konstruktiven Parameter der Verbindungsstelle größere Dimensionen erfordern als das Wasser bis zur Einschraubstelle diffundiert. Beispielsweise sind Bauteildicken von unter 13,6 mm notwendig, damit der direkte Kontakt des Sorptionsbereiches zu den Gewindeflanken in der Verbindungsstelle besteht.

6.4.4 Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung

Bild 6.25 stellt die Überdrehmomente und die maximal übertragbare Vorspannkraft der Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung in Abhängigkeit des Konditionierungszustandes dar. Die Ergebnisse zeigen dabei einen tendenziellen Abfall des Überdrehmomentes und der maximal übertragbaren Vorspannkraft. Diese Tragfähigkeitsminderung ist mit der geringeren mechanischen Belastbarkeit des Materials mit zunehmendem Feuchtegehalt zu erklären. Die Reduzierung der übertragbaren Vorspannkraft infolge der Wasserabsorption liegt zwischen 20 °C, 30% rel. LF konditionierten Zustand und feuchtem Zustand bei fast 2 kN bzw. 12% (bezogen auf den Mittelwert).

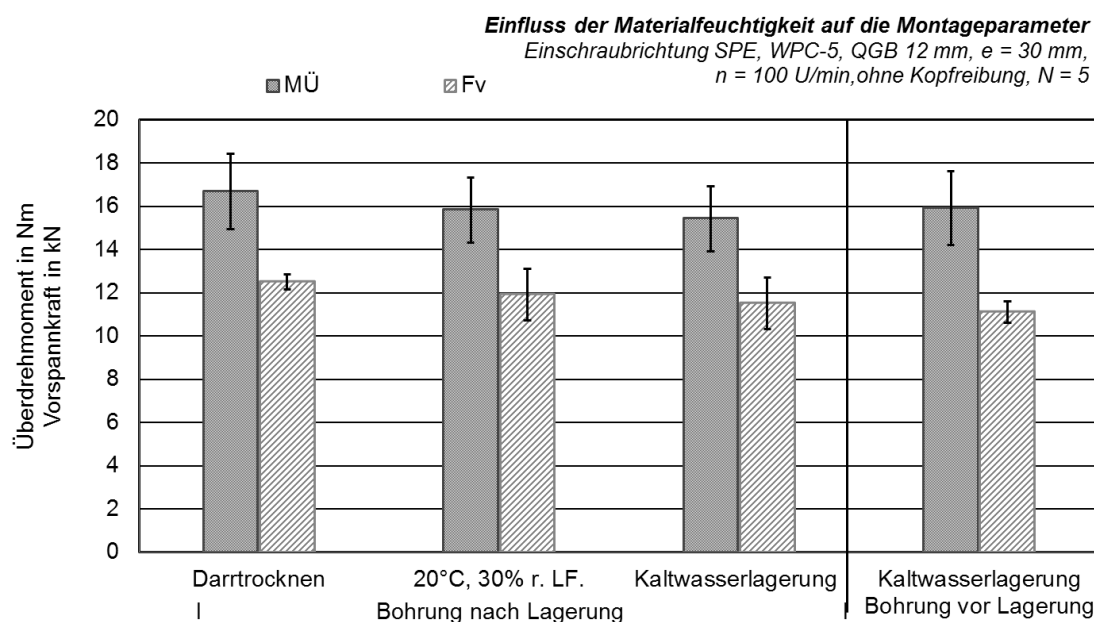


Bild 6.25: Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter der QGB-Steckschraubverbindung, abgebildet durch die Konditionierung bei 103 °C (darrtrocken), bei Raumklima (20°C, 30% rel. LF) und unter Kaltwasserlagerung, Konditionierungsdauer = 90 Tage. Materialfeuchtigkeit darrtrocken = 0%, Raumklima = 1,2%, Kaltwasserlagerung = 7,25%, [Sch18a].

Die makroskopische Querschnittsaufnahme in Bild 6.26 stellt den Sorptionsbereich der im Kaltwasser ausgelagerten QGB-Steckschraubverbindungen dar, deren Bohrungen sowohl vor als auch nach der Konditionierung gesetzt wurden.

Der Sorptionsbereich ist im Probenmaterial, welches vor der Auslagerung gebohrt worden ist, aufgrund des direkten Wasserkontaktes stärker ausgeprägt. Dieser größere Sorptionsbereich geht aber nur tendenziell mit einer geringeren Belastbarkeit der Verbindungsstelle einher, da die Dickenquellung um 6,2% die tragende Fläche zum Quergewindebolzen vergrößert. Somit kompensiert die Flächenvergrößerung infolge der Quellwirkung die Festigkeitsminderung der tragenden Fläche durch den Wassersorptionsbereich.

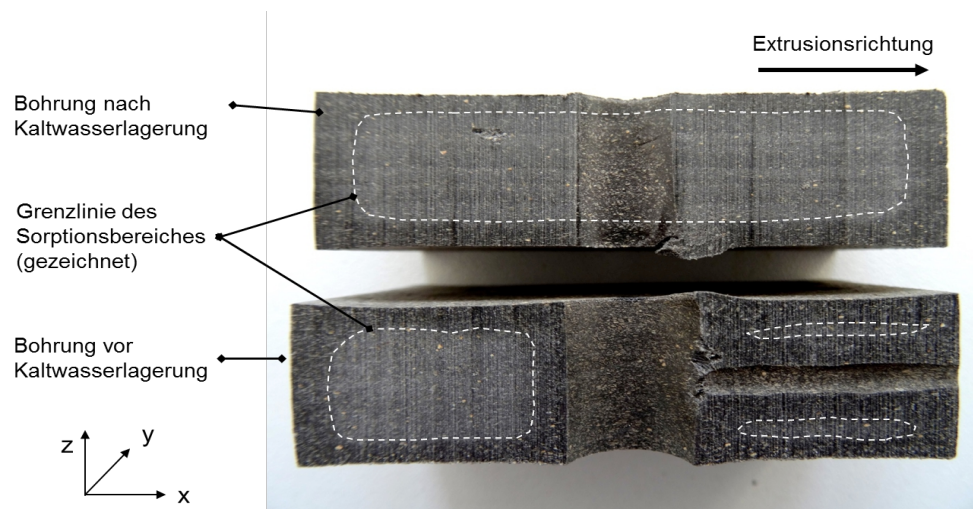


Bild 6.26: Sorptionsbereich der im Überdrehversuch versagten QGB-Steckschraubverbindung des Materials WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung (Einschraubrichtung S-PE Richtung, Sichte Ebene entspricht S-SE Richtung bzw. Längsrichtung)

Die Wasserabsorption in Dickenrichtung ist für die Tragfähigkeitsminderung der QGB-Steckschraubverbindungen am stärksten verantwortlich. Der Sorptionsbereich, der mit einer mechanischen Materialschwächung einhergeht, verursacht die Abminderung der tragenden Fläche des Quergewindebolzens. Für die QGB-Steckschraubverbindung kann diese Minderung stetig eintreten, da die Verbindungsstelle direkten Kontakt zum Umgebungsklima besitzt.

6.5 Schraubverbindungen im Betriebszustand

6.5.1 Statische Auszugskraft im vorgespannten Zustand

Bild 6.27 stellt die maximale Auszugskraft und die Verbindungssteifigkeit der Einschraubverbindungen mit zunehmender Montagevorspannkraft dar. Für beide Einschraubverbindungen wurde eine nahezu gleiche Verankerungsfläche zugrundegelegt. Es zeigt sich, dass nahezu unabhängig von der beaufschlagten Vorspannkraft die QGB-Steckschraubverbindung im Mittel bei 10 kN und die Direktverschraubung bei 13,5 kN versagten. Wird die QGB-Steckschraubverbindung mit einer Montagevorspannkraft beaufschlagt, so erfährt die Verbindung eine Erhöhung der Auszugskraft um etwa 1 kN. Diese Vorspannung begünstigt in QGB-Steckschraubverbindungen eine Lagefixierung der Verbindungsmittel unter Berücksichtigung der gesamten Lagetoleranzabweichung. Hierfür sind bereits geringe Vorspannkraften ausreichend ($F_v = 2 \text{ kN}$). Die ermittelten statischen Auszugskräfte zeigen, dass die Direktverschraubung in Holz-Polymer-Werkstoffen eine um 3,5 kN höhere statische Tragfähigkeit besitzt als die QGB-Steckschraubverbindung.

unter Berücksichtigung der nahezu gleichen Verankerungsfläche. Das untermauert die vorangegangenen Ergebnisse aus den Montageversuchen.

Im unverspannten Zustand besitzen die Direktverschraubungen eine um 3 kN/mm größere Verbindungssteifigkeit als die QGB-Steckschraubverbindung. Werden die Verbindungen mit einer Montagevorspannkraft beaufschlagt, nimmt die Gesamtsteifigkeit der Verbindungsstelle grundsätzlich mit zunehmender Montagevorspannkraft zu. Bei einer Montagevorspannkraft von 6 kN erreichen beide Einschraubverbindungen die gleiche Verbindungssteifigkeit. Es ist auffallend, dass die Direktverschraubung ab 6 kN keine weitere Steifigkeitserhöhung erfährt, die ein stärkeres Vorspannen der Verbindung über 6 kN rechtfertigt. Im Gegensatz dazu, erfahren die QGB-Steckschraubverbindungen mit zunehmender Montagevorspannkraft einen stetigen Steifigkeitszuwachs. Dabei ist jedoch der stärkere Vorspannkraftabfall mit zunehmender Montagevorspannkraft zu berücksichtigen, wodurch die hohe Anfangsvorspannung innerhalb kurzer Zeit stärker abfällt und die Verbindungssteifigkeit nicht gleichermaßen mit der Montagevorspannkraft ansteigt. Dies ist bereits an der geringen Steifigkeitserhöhung bei Steigerung der Montagevorspannkraft von 6 kN auf 9 kN ersichtlich.

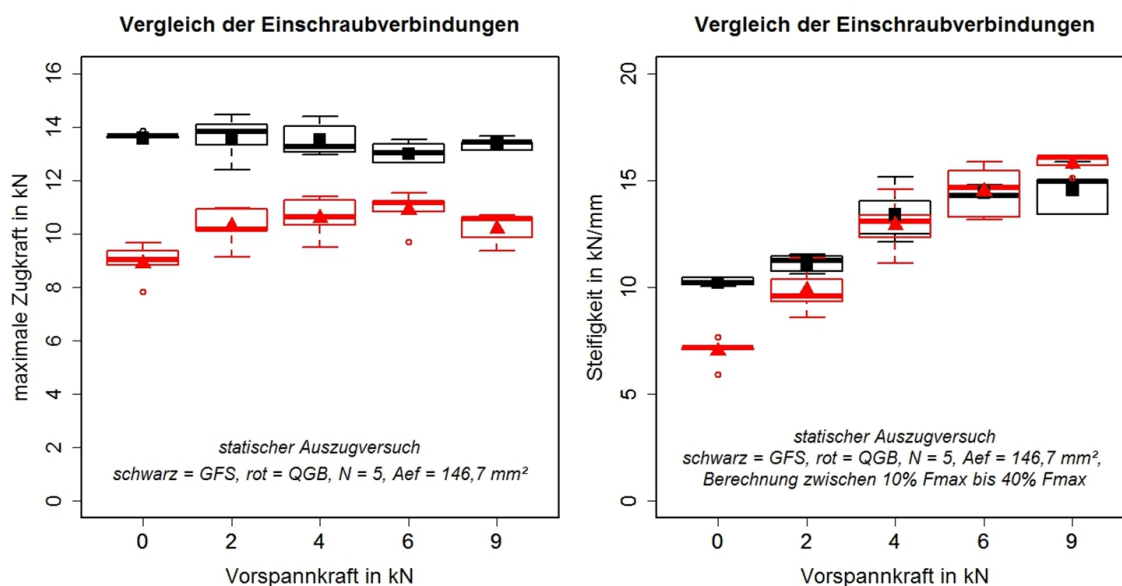


Bild 6.27: Statische Auszugskraft (links) und Verbindungssteifigkeit (rechts) vorgespannter Einschraubverbindungen [Sch18a]

6.5.2 Vorspannkraftverlauf beider Einschraubverbindungen

Bild 6.28 links stellt die Vorspannkraftrelaxation beider Schraubverbindungen für die Montagevorspannkraft von 4 kN gegenüber. Wie zu erwarten war, fällt in beiden Schraubverbindungen die Montagevorspannkraft direkt mit dem Abschalten der Schraubspindel ab. Dabei weist die Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung eine deutlich größere Relaxationsgeschwindigkeit auf als die Direktverschraubung. Sodass die

Vorspannkraft nach 110 Tagen in QGB-Steckschraubverbindungen auf 50% von der Anfangsvorspannkraft und in Direktverschraubungen auf 70% von der Anfangsvorspannkraft abgesunken ist. Damit relaxiert die Vorspannkraft der QGB-Steckschraubverbindung in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen um 20% stärker als die der Direktverschraubung.

Da die Vorspannkraftrelaxation in Schraubverbindungen viskoelastischer Werkstoffe sowohl von der aufgetragenen Spannung als auch von der Verbindungssteifigkeit abhängig ist, muss eine abweichende Verbindungssteifigkeit und/oder eine veränderte Flächenpressung im Verankerungsbereich zugrunde liegen. Je geringer die Flächenpressung und je größer die Verbindungssteifigkeit, umso kleiner ist die Vorspannkraftrelaxation in der Verbindungsstelle.

Die Annahme einer abweichenden Verbindungssteifigkeit wird durch die gemessene Steifigkeit aus der Drehmoment-Drehwinkel-Kurve während der Schraubmontage bestätigt (Bild 6.28 rechts). Dabei weist die Direktverschraubung im Mittel eine doppelt so große Steifigkeit auf als die QGB-Steckschraubverbindung. Dies trägt zur geringeren Vorspannkraftrelaxation in der Direktverschraubung.

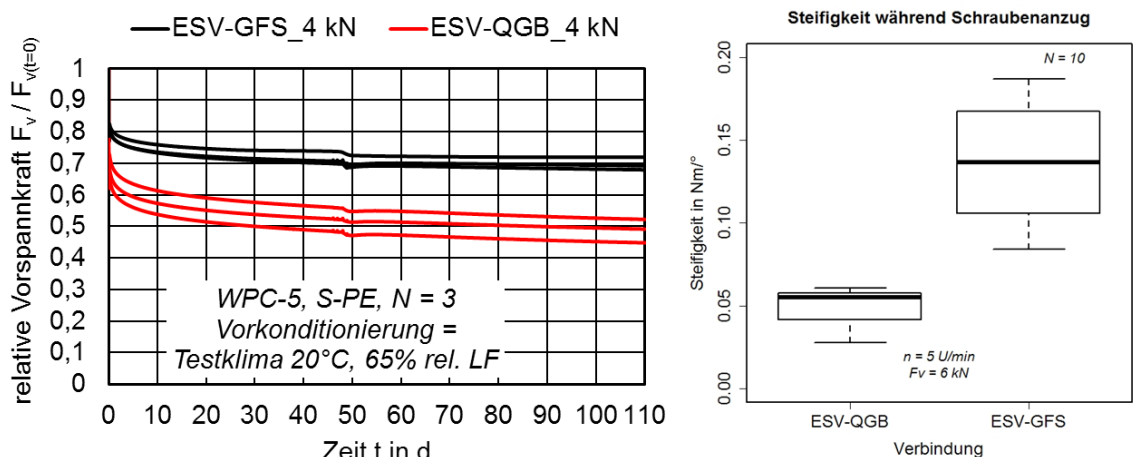


Bild 6.28: Relativer Vorspannkraftverlauf beider Schraubverbindungen mit $F_v = 4$ kN (links) und Verbindungssteifigkeit aus Drehmoment-Drehwinkel-Kurve ermittelt (rechts); theoretische Verankerungsfläche $A_{ver} = 146,7$ mm², konstruktive Kenngrößen und Verbindungsmittel gemäß Tabelle 5.4.

Zur Auslegung der Flächenpressung liegt, wie im Maschinenbau üblich, die projizierte Verankerungsfläche in beiden Schraubverbindungen zugrunde. Für die QGB-Steckschraubverbindung berechnet sich diese aus dem Produkt des Bolzendurchmessers und der Bolzenlänge abzüglich des Durchmessers der Sacklochbohrung. Da die Bolzenverbindung für die einfache Montage als Spielpassung ausgeführt wurde, ist die reale Kontaktfläche kleiner als die berechnete projizierte Verankerungsfläche. Des Weiteren zeigt die mikroskopische Darstellung der Verankerungsfläche in Bild 6.29 eine Flächenvergrößerung in Abhängigkeit der aufgetragenen Vorspannkraft im Bolzengrund. Da sich

die Vorspannkraft auf eine geringere Fläche verteilt, ist die reale Flächenpressung größer als die theoretisch berechnete. Damit ist sie nicht ohne weiteres mit der berechneten Verankerungsfläche in Direktverschraubungen gleichzusetzen. Die größere Flächenpressung zieht eine stärkere Vorspannkraftrelaxation nach sich und bestätigt die formulierte Annahme zur fehlerbehafteten Flächenpressung und lastabhängigen Flächenvergrößerung in Bild 6.29.

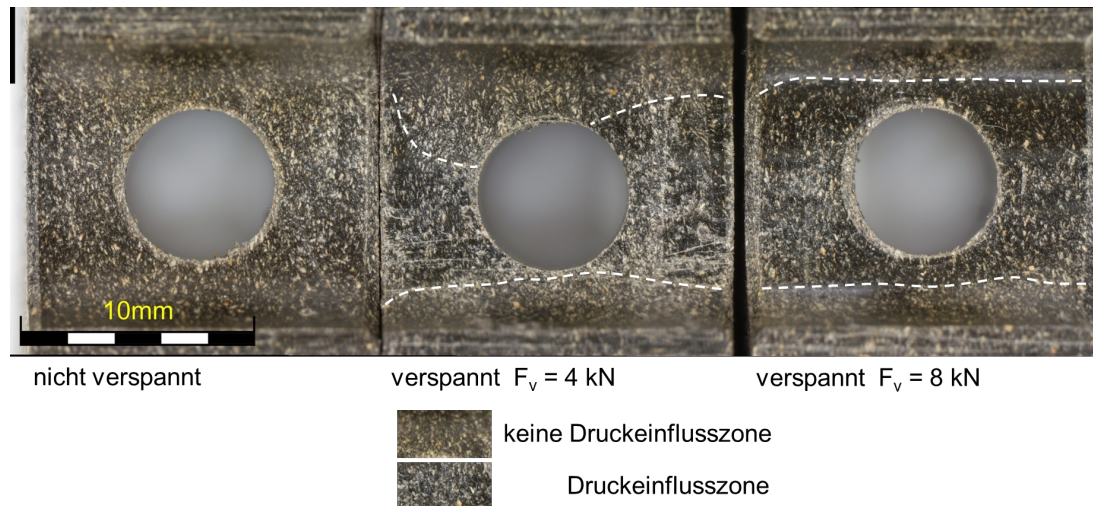


Bild 6.29: Reale Kontaktfläche der QGB an der Bohrungswandung in Abhängigkeit von der Vorspannkraft.

6.5.3 Vorspannkraftverlauf bei unterschiedlicher Materialfeuchtigkeit

Die nachfolgenden Diagramme in Bild 6.30 stellen sowohl für die QGB-Steckschraubverbindung als auch für die Direktverschraubung die Vorspannkraftrelaxation unterschiedlich vorkonditionierter Proben gegenüber.

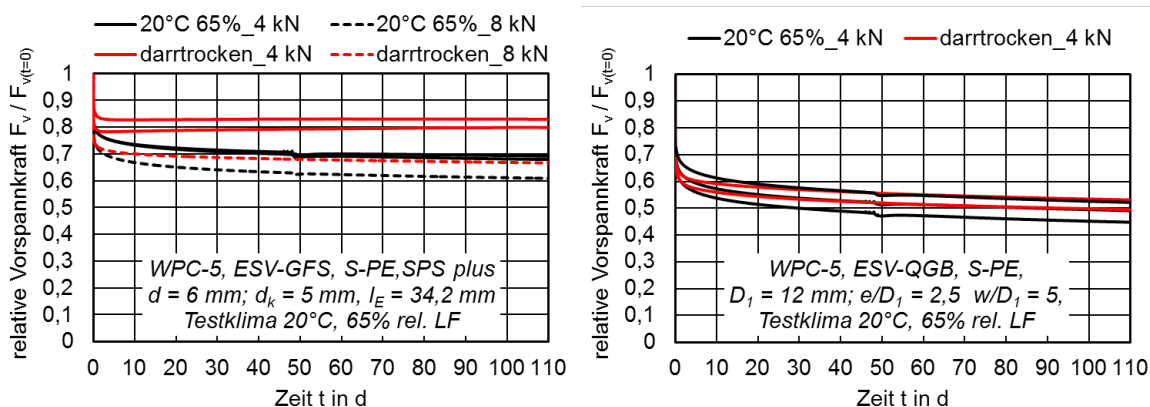


Bild 6.30: Relativer Vorspannkraftverlauf für Direktverschraubungen (links) und QGB-Steckschraubverbindungen (rechts) an unterschiedlich vorkonditioniertem Probenmaterial, Einzelmessungen

Die Vorkonditionierung unterscheidet sich in Darrtrocknen der Probekörper und 110-tägiger Lagerung bei 20 °C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit. Mit der vorgelagerten Darrtrocknung wird der Effekt der Feuchtigkeitsaufnahme und Materialquellung auf die nachfolgende Vorspannkraftrelaxation der Schraubverbindung abgebildet. Für die Probekörperkonditionierung und für die Dauer des Vorspannkraftrelaxationsversuches stellt Tabelle 6.4 die ermittelten Materialfeuchtigkeiten gegenüber. Es zeigt sich, dass die darrgetrockneten Proben innerhalb des Relaxationsversuches eine 2,5-fach höhere Materialfeuchte erreichen als die im Testklima vorkonditionierten Probekörper.

Tabelle 6.4: Feuchtegehalt der Testproben, $N = 8$

Vorkonditionierung	Darrtrocknen, $t_s = 40$ Tage	20 °C, 65% rel. LF; $t_s = 110$ Tage
$u_{\text{Vorkonditionierung}} [\%]$	0	1,79
$u_{\text{Versuchsende}} = u_{\text{Gesamt}} [\%]$	1,80	2,2
$\Delta u [\%]$	1,80	0,41

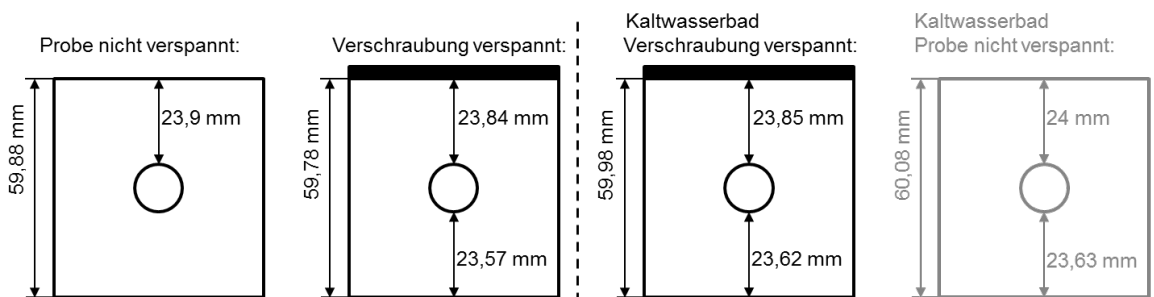
Hinsichtlich des Vorspannkraftabfalles zeigt sich bei beiden Einschraubverbindungen, dass unabhängig von der Materialfeuchtigkeit der größte Vorspannkraftverlust um 15% bis 30% direkt nach der Schraubmontage stattfindet. Nach dem anfänglichen Vorspannkraftabfall relaxieren die verschieden konditionierten Proben der Direktverschraubung unterschiedlich stark. Es zeigt sich, dass sowohl für die Anfangsvorspannkraft von 4 kN als auch von 8 kN innerhalb der ersten drei Tage die darrgetrockneten Proben eine um fast 10% geringere Vorspannkraftrelaxation besitzen. Das ist womöglich auf die feuchtigkeitsbedingte Quellneigung des Materials zurückzuführen, welches die viskoelastische Vorspannkraftrelaxation um ein bestimmtes Maß kompensiert und damit dem weiteren Vorspannkraftabfall entgegenwirkt. Nach dem Vorspannkraftverlust direkt nach Montagestopp bleibt die Vorspannkraft der darrgetrockneten Proben über den restlichen Testzeitraum auf ein und demselben Niveau bestehen, sodass innerhalb dieses Zeitraumes eine konstante Vorspannkraft in der Direktverschraubung vorliegt.

Dem gegenübergestellt führt die unterschiedliche Probenvorkonditionierung in QGB-Steckschraubverbindungen weder zu einem erhöhten, noch über einen längeren Zeitraum gleichbleibenden Vorspannkraftverlauf. Unabhängig von dem erzwungenen Quelleffekt relaxieren die QGB-Steckschraubverbindungen der unterschiedlich vorkonditionierten Proben gleich stark. Scheinbar beeinflusst die Feuchtigkeitsaufnahme und die damit einhergehende Quellneigung nicht den Vorspannkraftverlauf der QGB-Steckschraubverbindung.

Die Ursache der abweichenden Vorspannkraftverläufe beider Verschraubungen ist in den mit der Feuchtigkeitsaufnahme einhergehenden Quellung und Änderung der mechanischen Eigenschaften zu begründen. Je nach Lage des Verbindungsmittels haben beide

Effekte unterschiedlichen Einfluss auf den Vorspannkraftverlauf. In weiterführenden Versuchen zum Quell- und Sorptionsverhalten in der 28-tägigen Kaltwasserlagerung von verspannten Schraubverbindungen und unverspannten Proben konnten beide Effekte getrennt untersucht werden. Bild 6.31 zeigt die Geometrieänderung der im Kaltwasser gelagerten Schraubverbindungen und unverspannten Proben. Es fällt auf, dass die nicht vorgespannten Proben stärker quellen, als die mit einem Anbauteil verspannten Schraubverbindungen. Sodass angenommen werden kann, dass die freie Volumenquellung in Längsrichtung durch das verspannten Anbauteil gehemmt ist und sich dadurch ein Quelldruck aufbaut, der in beiden Schraubverbindungen eine Vergrößerung der Klemmkraft zur Folge hat.

QGB- Steckschraubverbindung:



Direktverschraubung:

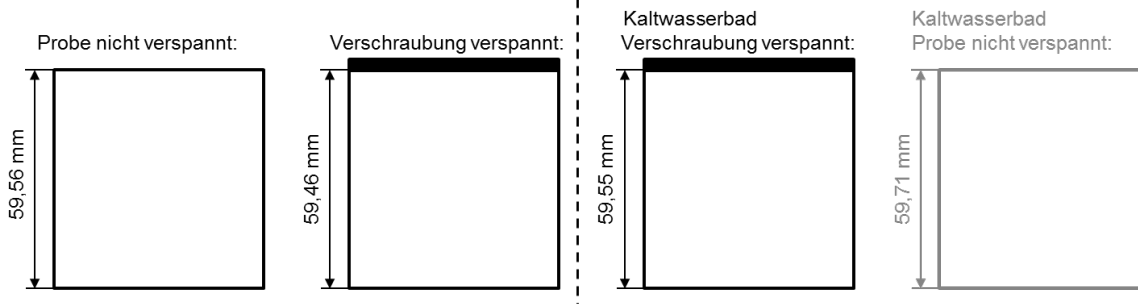


Bild 6.31: Geometrie der im Kaltwasser ausgelagerten Proben, $t = 28 \text{ d}$, unverspannt und mit Anbauteil verspannt auf ca. $F_v = 6 \text{ kN}$, $N = 5$

Zusätzlich erfährt der QGB durch die Dicken- und Längsquellung eine Vergrößerung der Auflagefläche zur Bohrungswandung (Bild 6.32) in der Steckschraubverbindung. Damit wird der durch das Quellen einhergehende Klemmkraftzuwachs gleichzeitig auf eine größere Fläche verteilt, sodass womöglich die Flächenpressung im Vergleich zu den darrtrockenen Proben unverändert bleibt.

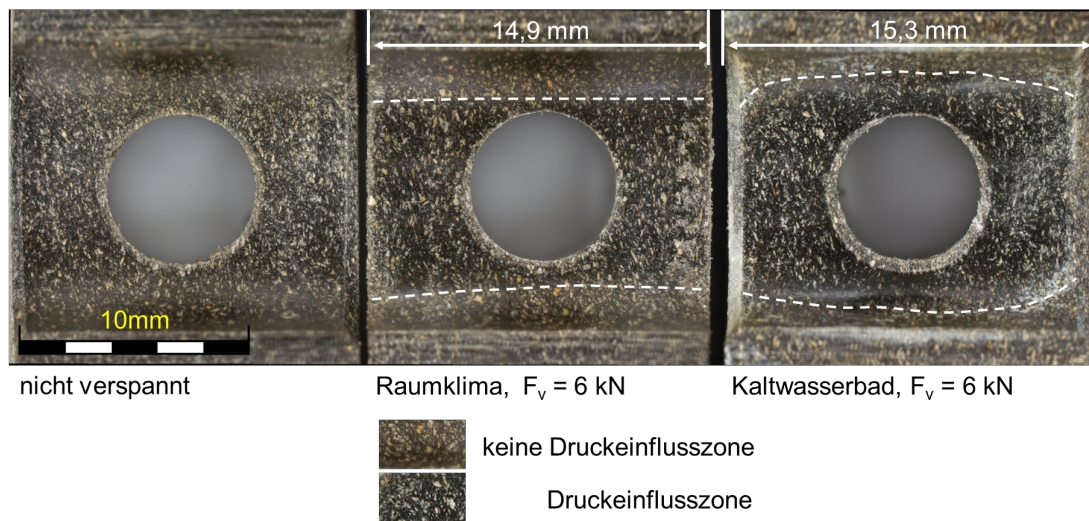


Bild 6.32: Probendicke und QGB-Kontaktfläche an der Bohrungswandung von verspannten QGB-Steckschraubverbindungen nach Konditionierung im Raumklima (Mitte) und im Kaltwasser (rechts)

Bild 6.33 stellt den Sorptionsbereich der im Kaltwasser konditionierten verspannten Schraubverbindungen dar.

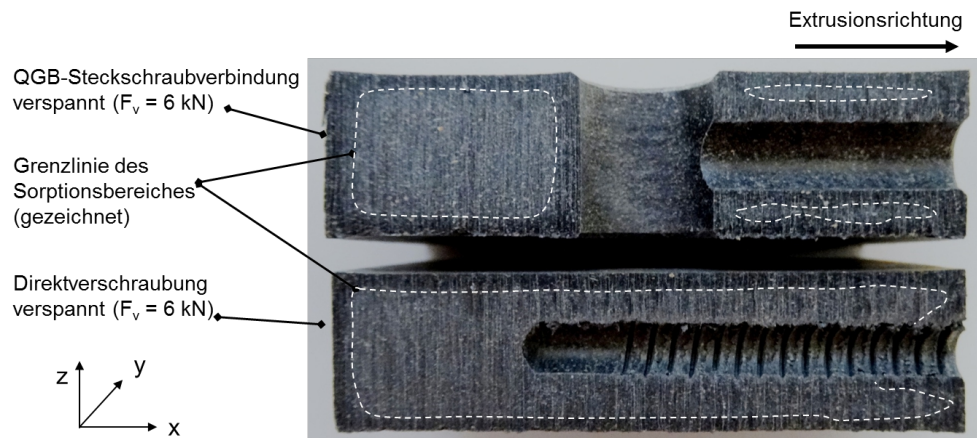


Bild 6.33: Sorptionsbereich nach 28-tägiger Kaltwasserlagerung der mit ca. 6 kN verspannten QGB-Steckschraubverbindung (oben) und Direktverschraubung (unten), Einschraubrichtung S-PE Richtung

Es ist zu erkennen, dass an allen Stellen der QGB-Steckschraubverbindung das WPC-Material Wasser absorbiert hat. Ob das Wasser dabei ausschließlich im Bereich der Spielpassung des Bolzens oder des verspannten Anbauteils in die Verbindungsstelle eintreten kann, ist reine Spekulation. Gesichert ist, dass die gesamte tragende Fläche der QGB-Steckschraubverbindung, die im Bolzengrund liegt, durch den festigkeitsmindernden Sorptionsbereich umgeben ist. Aus umfangreichen Literaturquellen ist bekannt, dass mit zunehmender Materialfeuchtigkeit im WPC die Festigkeit und Materialsteifigkeit sinkt und

die Dehnung / Nachgiebigkeit zunimmt [Hua06, Rad07]. Es ist davon auszugehen, dass die Materialsteifigkeit über die gesamte lasttragende Fläche gesunken ist.

Der Wassersorptionsbereich der Direktverschraubung ist hingegen großteils nur außen ausgebildet, sodass die tragende Verankerungsfläche der Schraube nicht mit dem Sorptionsbereich in Berührung kommt und keinen Steifigkeits- und Festigkeitsverlust erfährt. Ausnahme bilden die ersten vier Gewindegänge. In diesem Bereich konnte Wasser eindiffundieren. Das entspricht etwa 26% von der gesamten tragenden Fläche.

Um den Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Steifigkeit beider Schraubverbindungen zu qualifizieren, wurden nach Abschluss der Kaltwasserlagerung der Weiterdrehversuch an beiden Probenchargen durchgeführt. Aus der Drehmoment-Drehwinkelkurve wurde zwischen zwei Punkten die Steifigkeit aus dem Verhältnis der Drehmomentendifferenz zur Drehwinkeldifferenz gebildet. Die Diagramme in Bild 6.34 stellen die im Weiterdrehversuch ermittelte Verbindungssteifigkeit an im Raumklima und im Kaltwasser ausgelagerten Schraubverbindungen gegenüber. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Direktverschraubungen durch die einwirkende Feuchtigkeit einen tendenziellen Steifigkeitszuwachs erfahren. Bei den QGB-Steckschraubverbindung bleibt die Verbindungssteifigkeit in Folge der Kaltwasserlagerung unverändert.

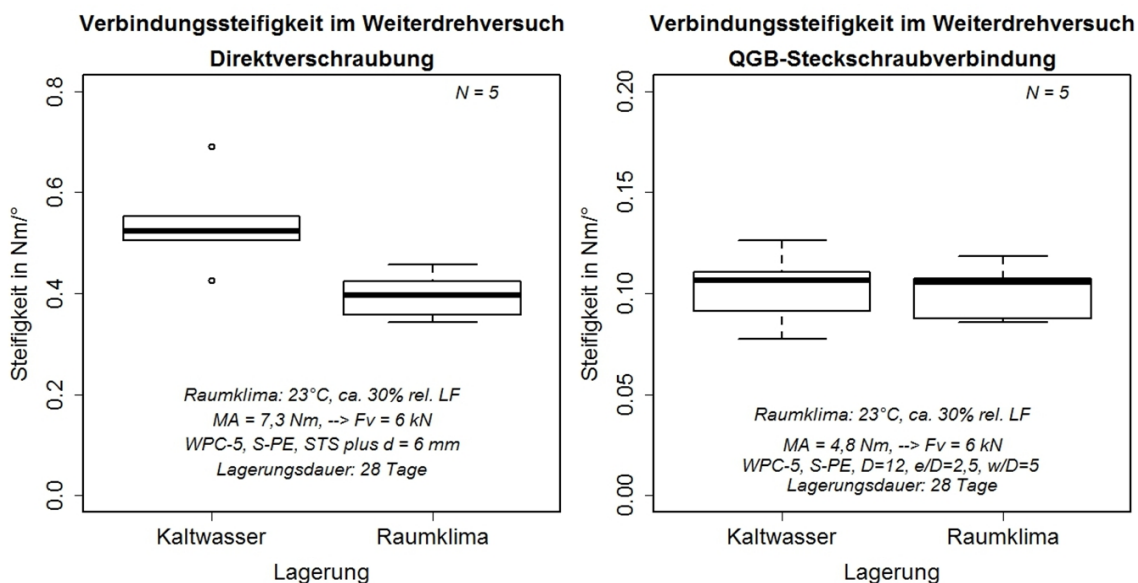


Bild 6.34: Verbindungssteifigkeit ermittelt im Weiterdrehversuch der im Kaltwasser und im Raumklima konditionierten Schraubverbindungen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei beiden Schraubverbindungen die Vorspannkraft infolge des Quelldruckes ansteigt. Bei der Direktverschraubung bleibt die Materialsteifigkeit und die tragende Fläche im lasttragenden Bereich nahezu unverändert. Dadurch erfährt die Verbindung einen Steifigkeitszuwachs, der eine geringere Vorspannkraftrelaxation nach sich zieht. Die Feuchtigkeitsaufnahme im WPC führt zu einem Vorspannkraftzuwachs in Direktverschraubungen, der bewirkt, dass der viskoelastische

Vorspannkraftabfall kompensiert wird (alle roten Kurve in Bild 6.30 links). In QGB-Steckschraubverbindungen nimmt zusätzlich die tragende Fläche aufgrund der Längen- und Dickenquellung zu, sodass der durch die Quellneigung vorhandene Vorspannkraftzuwachs auf eine größere Fläche verteilt wird. Gleichzeitig lässt die tragende Fläche eine größere Verformung zu. Der Kraftzuwachs wird damit durch die größere Verformung des Materials im Bereich der tragenden Fläche kompensiert, sodass die Verbindung keine Steifigkeitsänderung erfährt. Die Feuchtigkeitsaufnahme im WPC führt in QGB-Steckschraubverbindungen zu keiner abweichenden Vorspannkraftrelaxation (rote Kurve in Bild 6.30 rechts).

6.5.4 Vorspannkraftverlauf nachgezogener Schraubverbindungen

Die erarbeitete Nachziehmethode in Kapitel 6.3.2 hatte in QGB-Steckschraubverbindungen bei verhältnismäßig vielen Nachziehintervallen nur eine geringe Reduzierung der Relaxationsgeschwindigkeit bewirkt. Daher wird nachstehend die Langzeitvorspannkraftmessung nur an Direktverschraubungen dargestellt. Die Ergebnisse zum Schraubennachzug in Kapitel 6.3.2 zeigten, dass durch das Nachziehen die Direktverschraubungen unabhängig von der Montagevorspannkraft relaxierten. Ob sich dieser Effekt über einen längeren Testzeitraum fortsetzt, ist Versuchsgegenstand der kontinuierlichen Vorspannkraftmessung über einen Zeitraum von 28 Tagen. Die Probenlagerung und die Messung erfolgte in ein und demselben Raumklima. Bild 6.35 stellt die kontinuierlichen Vorspannkraftrelaxationskurven von nachgezogenen und nicht nachgezogenen Direktverschraubungen für die Montagevorspannkräfte von $F_v = 2 \text{ kN}$ und $F_v = 6 \text{ kN}$ gegenüber.

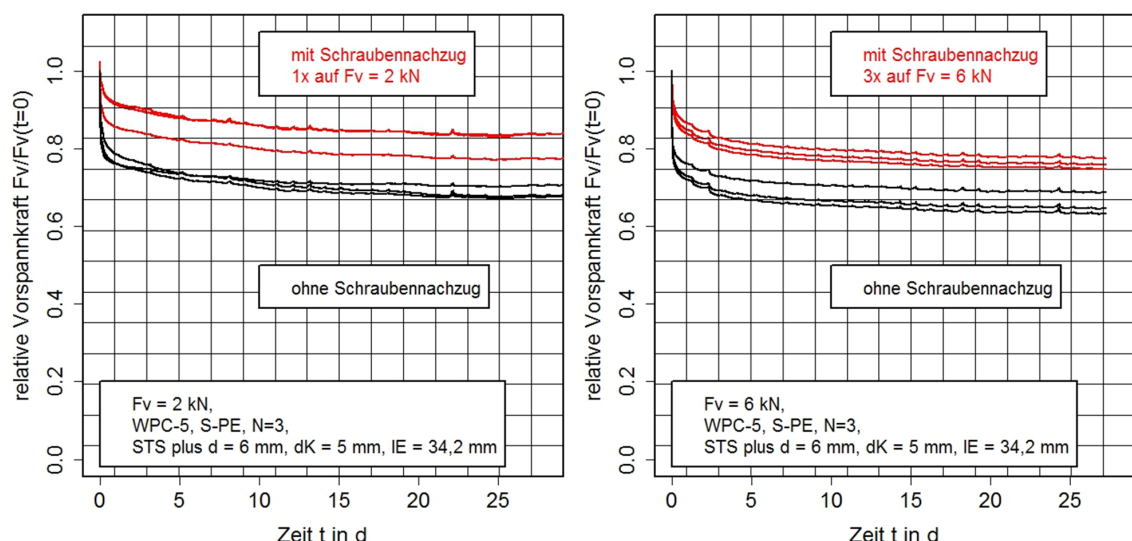


Bild 6.35: Relativer Vorspannkraftverlauf über 28 Tage von nachgezogenen und nicht nachgezogenen Direktverschraubungen mit der Montagevorspannkraft von $F_v = 2 \text{ kN}$ (links) und $F_v = 6 \text{ kN}$ (rechts), Raumklima $20^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}$, 29% - 34% rel. LF

Der Startpunkt der Kurven ist der Zeitpunkt des letzten Schraubennachzugs. Daher sind die jeweiligen Nachziehintervalle nicht mit dargestellt. Das Nachziehen erfolgt auf Basis der Ergebnisse aus Kapitel 6.3.2. Die Änderung des Kurvenanstieges stellt die Änderung der Relaxationsgeschwindigkeit dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei beiden Montagevorspannkraften die nachgezogenen Schraubverbindungen über den gesamten Testzeitraum weniger relaxieren. Durch den anfänglichen Schraubennachzug fällt die Vorspannkraft innerhalb der ersten 5 Tage langsamer ab. Darüberhinaus liegen die Kurven nahezu parallel verschoben übereinander, sodass bei beiden Schraubfällen die Relaxationsgeschwindigkeit über die Zeit konstant weiter verläuft.

Aus den kontinuierlichen Vorspannkraftkurven in Bild 6.35 wurde die Relaxationsgeschwindigkeit für den Zeitraum von 28 Tagen ausgewertet und in Abhängigkeit von der Montagevorspannkraft im linken Diagramm des Bildes 6.36 dargestellt.

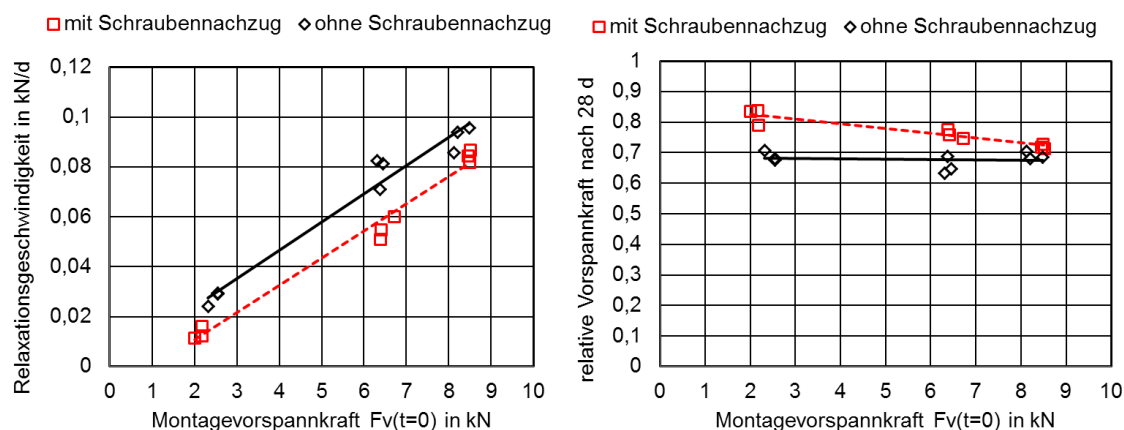


Bild 6.36: Relaxationsgeschwindigkeit (links) und relative Restvorspannkraft (rechts) nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Anfangsmontagevorspannkraft, Einzelwerte aus kontinuierlicher Vorspannkraftmessung abgelesen, $N = 3$

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Relaxationsgeschwindigkeit zeitlichen Änderungen unterliegt, die in den Diagrammen nicht dargestellt sind. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Relaxationsgeschwindigkeit mit zunehmender Montagevorspannkraft sowohl bei nachgezogenen als auch nicht nachgezogenen Direktverschraubungen linear zunimmt. Somit hat sich die scheinbar belastungsunabhängige Vorspannkraftrelaxation, welche aus den Nachziehversuchen in Kapitel 6.3.2 zu vermuten war, nicht bestätigt. Das bedeutet, je größer die Anfangsvorspannkraft, umso schneller fällt die Vorspannkraft mit der Zeit ab. Die Langzeitversuche bestätigten deutlich, dass das Nachziehen unabhängig von der Montagevorspannkraft eine Reduzierung der Relaxationsgeschwindigkeit nach sich zieht und somit für Direktverschraubungen in WPC technisch relevant ist.

Die auf die Anfangsvorspannkraft relativierte Restvorspannkraft in Bild 6.36 zeigt, dass die Differenz zwischen nachgezogenen und nicht nachgezogenen Schraubverbindungen mit

zunehmender Montagevorspannkraft sinkt. Sodass das Nachspannen bei hohen Montagevorspannkraften weniger wirksam ist als bei geringeren Montagevorspannkraften. Dennoch werden höhere Restvorspannkraften erreicht.

Trägt man die absoluten Restvorspannkraften nach 28 Tagen gegen die Anfangsvorspannkraft auf, stellt sich, wie zu erwarten war ein linearer Zusammenhang dar (Bild 6.37). Über diesen Zusammenhang kann für den definierten Zeitraum von 28 Tagen die Anfangsvorspannkraft für jede beliebige Restvorspannkraft ermittelt werden. Nach oben hin wird die Montagevorspannkraft lediglich durch das Überdrehen der Verbindungsstelle bzw. des Schraubenbruches begrenzt. Zur Übertragung auf eine längerer Nutzungsdauer ist es notwendig, die Messwerte mit Hilfe eines passenden Modells auf die gewünschte Dauer zu extrapolieren. Dies setzt ein exaktes mathematisches Modell voraus, welches nicht Gegenstand dieser Arbeit ist und in weiterführenden Untersuchungen erarbeitet werden sollte.

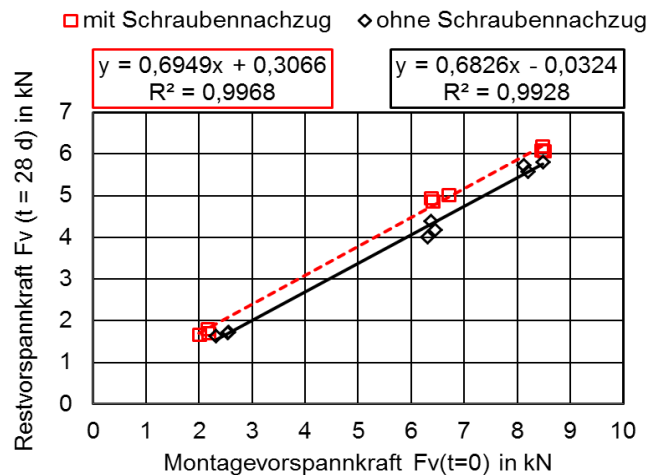


Bild 6.37: Restvorspannkraft nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Anfangsmontagevorspannkraft, $N = 3$

7 Diskussion

7.1 Empfehlung zur konstruktiven Gestaltung

Direktverschraubung mit gewindeformenden Schrauben

Auf Basis der Beurteilungskriterien hoher Momentendifferenz aus geringem Eindrehmoment und hohem Überdrehmoment und maximal übertragbarer Vorspannkraft der Schraube stellt sich im Ergebnis heraus, dass die gewindeformende Spezialschraube für Thermoplaste der vorteilhafte Schraubentyp für die Direktverschraubung hochgefüllter Holz-Polymer-Werkstoffe ist. Das Vorbohren der Verbindungsstelle ist zwingend erforderlich, um das Einschrauben zu ermöglichen und die Werkstoffüberbeanspruchung zu vermeiden. Bild 7.1 stellt die konstruktive Gestaltung der Verbindungsstelle der Direktverschraubung am Beispiel des Werkstoffes WPC-5 und des Schraubennenn-durchmessers $d_1 = 6 \text{ mm}$ dar.

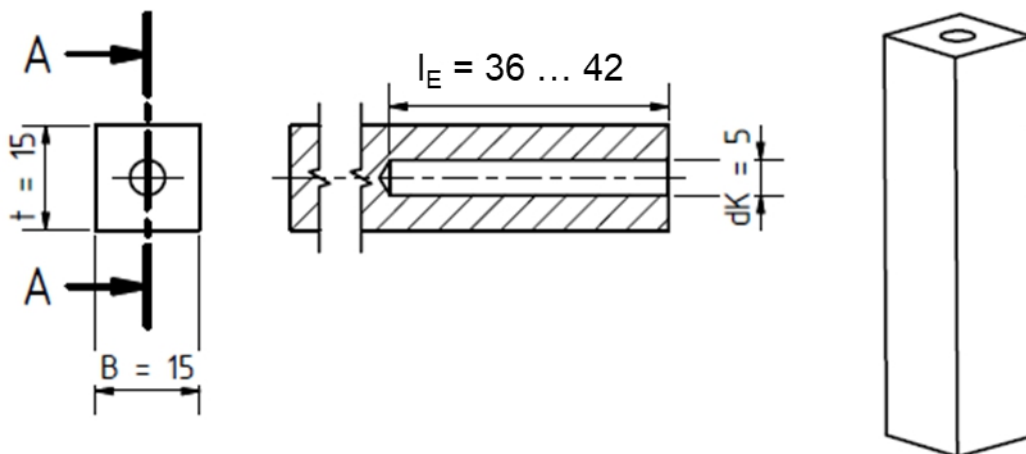


Bild 7.1: Konstruktive Gestaltung der Direktverschraubung in WPC-5 mit der Schraube für Thermoplaste (Schriever STS plus $d_1 = 6 \text{ mm}$)

Der vorteilhafte Kernlochdurchmesser d_K ist werkstoffabhängig und beträgt für die getesteten Werkstoffe bezogen auf den Nenndurchmesser d_1 :

$$\text{WPC-1: } d_K = 0,85 \cdot d_1 \quad (28)$$

$$\text{WPC-5: } d_K = 0,83 \cdot d_1 \quad (29)$$

$$\text{WPC-6: } d_K = 0,8 \cdot d_1 \quad (30)$$

Der Richtungseinfluss ist werkstoffabhängig ausgeprägt und nimmt unterschiedlich stark Einfluss auf die Einschraublänge, die Bauteildicke und der Bauteilbreite. In Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion erreicht die Schraubverbindung größere maximale Vorspann-

kräfte als in Scheibenrichtung. Jedoch versagt die Einschraubstelle vorzeitig bei größeren Randabständen durch Längsrisse entlang der Schraubenachse.

Für die montagefreundliche Verbindungsdimensionierung und einfache Handhabung im Montagefall ist es hingegen sinnvoll, den Richtungseinfluss bezüglich der Einschraublänge l_E , der Mindestbauteilbreite B und -dicke t zu vereinheitlichen. Daraus resultieren

$$l_{E_{max}} = 6 \dots 7 \cdot d_1 \quad (31)$$

$$B = t \geq 2,5 \cdot d_1 \quad (32)$$

Ist die Bauteilbreite B verhältnismäßig groß gegenüber der Bauteildicke t kann die Bauteilbreite auf das 2,16-fache des Nenndurchmessers reduziert werden. Sofern nicht anders klassifiziert, gelten die Angaben für den Werkstoff WPC-5.

Anhand des im statischen Auszugsversuch ermittelten Ausziehparameters f_{ax} lässt sich ein Tragfähigkeitsvergleich der Schraubverbindungen zu anderen in der Fördertechnik eingesetzten Holzwerkstoffen ziehen. Vergleichsbasis ist der zugrundegelegte Schraubennendurchmesser von $d_1 = 6$ mm der Direktverschraubung in WPC und des Schraubennendurchmessers M6 der Insertschraubverbindung in WVC. Dabei erreicht die Direktverschraubung in WPC einen fast vierfach höheren statischen Ausziehparameter als die in Birkenperrholz eingebrachten Schraubinserts (Inserttyp SK Fa. Rampa M6, WVC Birkenperrholz, $f_{ax} = 30$ N/mm² [Eck12]). Möglicherweise ist die Ursache in der deutlich höheren Rohdichte des hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffes zu finden.

Quergewindebolzen-Steckschraubverbindung

Nach bisherigem Kenntnisstand zu Bolzenverbindungen im Faserverbundbereich wird der Bolzendurchmesser entsprechend der Bauteildicke bemessen. Die Ergebnisse zum Einfluss des Bolzendurchmessers haben jedoch gezeigt, dass die größte Auszugsfestigkeit in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen mit den Bolzendurchmessern von $D_1 = 10$ mm und $D_1 = 12$ mm erreicht wird. Dies entspricht dem 0,66- bis 0,8-fachen der Bauteildicke. Es ist jedoch nicht notwendig für größere Bauteildicken größere Bolzendurchmesser zu verwenden, da die maximale Zugkraft der Maschinenschraube M6 10.9 mit 20,1 kN erreicht wurde. Größere Bolzendurchmesser führen sowohl in Bezug auf das Verbindungsmittel als auch in der Gestaltung der Bauteilbreite und der Eindringtiefe nur zu einer Überdimensionierung. Für größere Schraubendurchmesser muss die Übertragbarkeit der Empfehlung jedoch noch überprüft werden.

Die QGB-Steckschraubverbindungen versagen in Abhängigkeit von der Eindringtiefe e und der Bauteilbreite w durch ein Kombinationsversagen aus Spaltbruch entlang der Schraubachse und Lochleibungsversagen im Bolzengrund. Die konstruktive Gestaltung der Verbindung ist werkstoffabhängig jedoch nicht richtungsabhängig. Aus diesem Grund

sind für die getesteten Werkstoffe ein w/D_1 -Verhältnis in einem Bereich von drei bis fünf und folgende e/D_1 -Verhältnisse empfehlenswert:

$$\text{WPC-1: } e/D_1 = 3 \quad (33)$$

$$\text{WPC-5: } e/D_1 = 2,5 \quad (34)$$

$$\text{WPC-6: } e/D_1 = 3 \quad (35)$$

Der Richtungseinfluss bezüglich der Auszugskräfte ist werkstoffabhängig vorhanden. Die Auszugskräfte der QGB sind senkrecht zur Extrusionsrichtung um 3% bis 11% höher als parallel zur Extrusionsrichtung.

Bild 7.2 stellt die konstruktive Gestaltung der Verbindung für den Werkstoff WPC-5 und der Schraubengröße M6 dar.

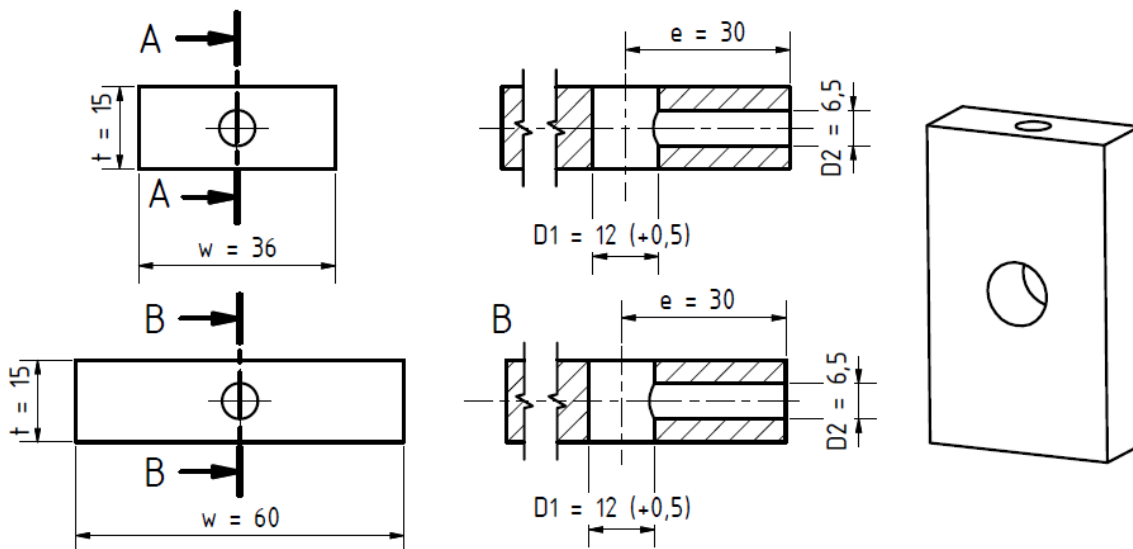


Bild 7.2: Konstruktive Gestaltung der QGB-Steckschraubverbindung M6 in WPC-5, mit $w/D_1 = 3$ (oben) und $w/D_1 = 5$ (unten), $D = 12$ mm, Schraube M6

Ein Versagensvergleich zu den in Bild 7.3 dargestellten Referenzwerkstoffen PVC und den Holzwerkstoffen WVC, OSB, Spanplatte und MDF stellt das deutlich sprödere Versagen der hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffe dar. Dieser Vergleich hebt den Sachverhalt hervor, dass die Übertragbarkeit vorhandener Dimensionierungsrichtlinien von Bolzenverbindungen nicht auf hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffe gegeben ist.

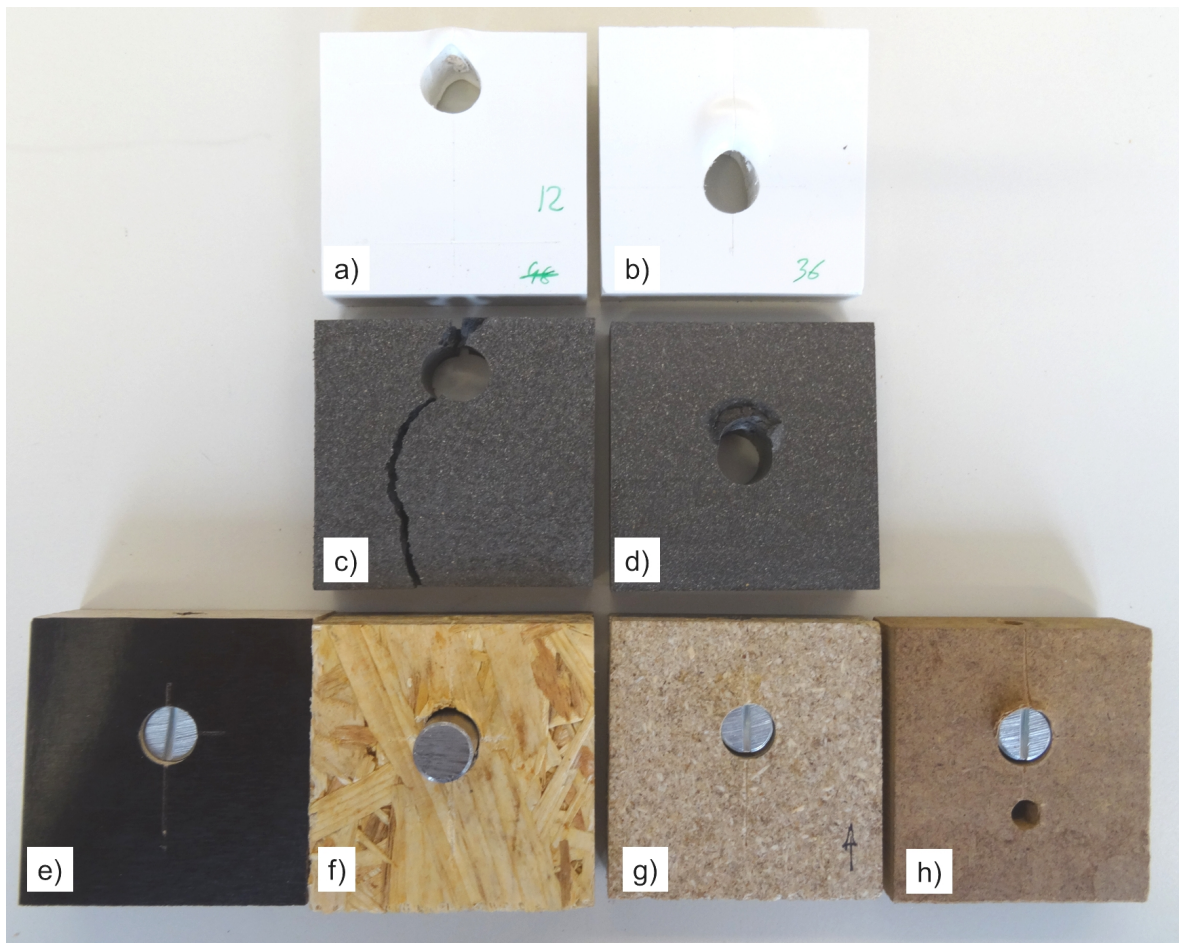


Bild 7.3: Versagensbild der QGB-Steckschraubverbindung M6 mit dem Bolzendurchmesser $D_1 = 12 \text{ mm}$ für die Werkstoffe:

- | | |
|--|---|
| a) PVC-hart, $t = 15 \text{ mm}$, $e/D_1 = 1$ | → Lochleibungsversagen |
| b) PVC-hart, $t = 15 \text{ mm}$, $e/D_1 = 3$ | → Lochleibungsversagen |
| c) WPC-5*, $t = 15 \text{ mm}$, $e/D_1 = 1$ | → Spaltbruchversagen |
| d) WPC-5*, $t = 15 \text{ mm}$, $e/D_1 = 2,5$ | → Lochleibungsversagen mit Kraterausbruch |
| e) WVC**, $t = 20 \text{ mm}$, $e/D_1 = 2$ | → Schraubenbruch bei $M_{SB} = 19 \text{ Nm}$ |
| f) OSB-3, $t = 21 \text{ mm}$, $e/D_1 = 2$ | → Lochleibungsversagen |
| g) Spanplatte, $t = 16 \text{ mm}$, $e/D_1 = 2$ | → Lochleibungsversagen |
| h) MDF, $t = 16 \text{ mm}$, $e/D_1 = 2$ | → Lochleibungsversagen |

*Belastungsrichtung = Einschraubrichtung = Parallel zur Verarbeitungsrichtung

**Birkensperrholz, 15 Lagen $0^\circ - 90^\circ$, Belastungsrichtung = Einschraubrichtung = Parallel zur 0° - Richtung der Decklage

7.2 Empfehlung maximaler Anzugmomente und Vorspannkräfte

Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse zur konstruktiven Auslegung wurde für die Berechnung des Anzugmomentes der Überdrehversuch mit Kopfreibung an beiden Schraubverbindungen durchgeführt. Es ist zu berücksichtigen, dass das Kopfreibmoment und damit das ermittelte Überdrehmoment mit Kopfreibung abhängig von der Oberflächenrauheit, der Größe der Auflagefläche und den Fügeteilen ist. Daher bezieht sich die Angabe ausschließlich auf dem in Bild 5.6 aufgeführten Verbindungsaufbau. Das Kopfreibmoment gilt für die Paarung aus Schraube und passender Unterlegscheibe vom Typ DIN 440R.

Für die Direktverschraubung wurde nach dem konservativen Ansatz das mittlere Anzugmoment nach Formel 7 (Kapitel 2.7.4) mit dem Faktor $k = 0,5$ berechnet. Zusätzlich ist der Streubereich von 23% [Wie07, S. 114] der Messwerte unter Anwendung des Anzugverfahrens mit Drehmomentenschlüssel mit dargestellt. Es ist bei jeder Einschraublänge sicherzustellen, dass das Anzugmoment stets unter dem Schraubenbruchmoment liegt und der Streubereich des Anzugverfahrens nie das minimale Überdrehmoment und maximale Eindrehmoment überschreitet. Im rechten Diagramm des Bildes 7.4 zeigt sich, dass unter Anwendung eines ungenau abschaltenden Anzugverfahrens (drehmomenten-gesteuertes Anziehen mit Drehschrauber [Wie07, S. 114]) im ungünstigsten Fall das Anzugmoment den Grenzarbeitsbereich der Schraube tangiert.

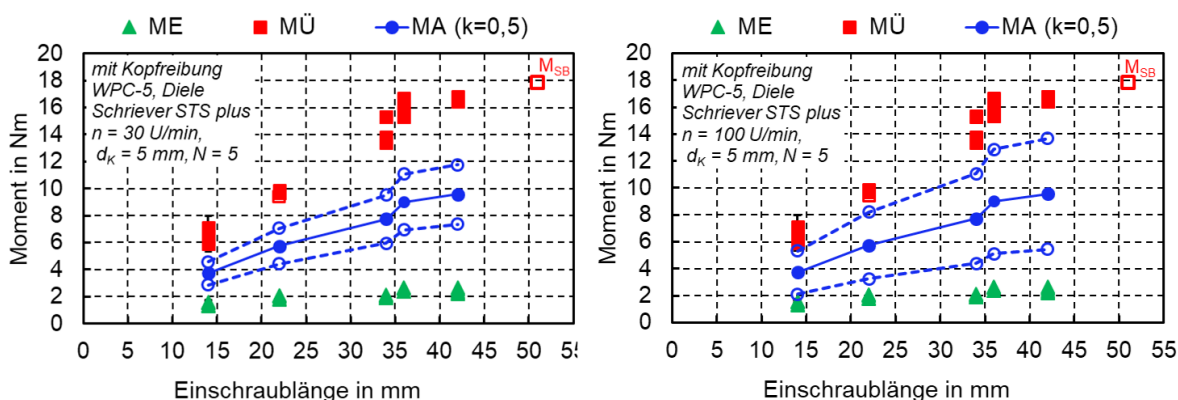


Bild 7.4: Darstellung der nach Formel 7 berechneten Anzugmomente auf Basis des Überdrehversuches mit Kopfreibung von Direktverschraubungen in WPC-5 für die Verwendung eines Drehmomentenschlüssels (links) und eines Drehschraubers (rechts).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit einem Präzisionsschraubgerät gearbeitet, das eine Abschaltgenauigkeit von 5% besitzt. Damit war es möglich größere Anzugmomente bei identischer Einschraublänge zu realisieren. Im Praxisfall ist der Einsatz von Drehmoment-schlüsseln etabliert. Tabelle 7.1. fasst für das drehmomentgeregelte Anziehverfahren mittels Drehmomentschlüssel die für unterschiedliche Einschraublängen zulässigen Anzugmomente und die resultierenden Vorspannkräfte von Direktverschraubungen und

QGB-Steckschraubverbindungen zusammen. Die Einschraublänge von 36 mm stellt hierbei die kritische Einschraublänge der WPC-Diele dar, bei der die Tragfähigkeit der Schraube der Tragfähigkeit des geformten Gewindes entspricht. Für die Berechnung des Anzugmomentes der QGB-Steckschraubverbindung wurde ebenfalls die Formel 7 angewendet. Das Eindrehmoment ist hierbei vernachlässigbar gering, da es dem Gewindereibmoment entspricht.

Tabelle 7.1: Mittlere Anzugmomente und resultierende Vorspannkkräfte, ermittelt im drehmomentengeregelten Anzugversuch $N = 5$

Verbindung	l_E [mm]	$M_{E\max}$	$M_{Ü\min}$	M_A [Nm] mit $k = 0,5$	$F_{v\min}, F_{v\max}$ [kN] bei M_A
ESV-GFS	14	1,57	5,89	3,73	2,34 bis 3,02
	22	2,08	9,4	5,74	4,65 bis 5,34
	34	2,11	11,27	7,75	5,81 bis 6,85
	36	2,67	12,67	9,01	7,18 bis 8,1
ESV-QGB		-	13,02	6,5	6,8 bis 7,95

Die Ergebnisse zur statischen Auszugsfestigkeit im verspannten Zustand zeigen, dass es nicht notwendig ist, eine auf Zug beanspruchte Schraubverbindung mehr als 6 kN vorzuspannen, da darüberhinaus keine weitere Erhöhung der Verbindungssteifigkeit erreicht werden konnte. Höhere Vorspannkkräfte in auf Zug beanspruchten Schraubverbindungen reduzieren lediglich nur die Schraubenzusatzkraft F_{SB} .

In auf querkraftbeanspruchten Schraubverbindungen ist hingegen die Vorspannkraft so hoch wie möglich anzusetzen, um den Vorspannkraftabfall zu berücksichtigen. Je nach gewünschter Restvorspannkraft und Dauer des Nutzungszeitraumes ist die Anfangsvorspannkraft aus den Diagrammen in Kapitel 6.5.4 zu ermitteln und unter Berücksichtigung des Anzugverfahrens mit den maximal zulässigen Anzugmomenten in Tabelle 7.1. abzugleichen.

7.3 Montageempfehlungen

Montagedrehzahl

Das Montagekonzept der zweistufigen Schraubmontage aus schnellem Eindrehen und langsamen Anziehen der Schraube wurde auf die Direktverschraubung in hochgefüllte Holz-Polymer-Werkstoffen übertragen. Die Ergebnisse in Kapitel 6.3.1 zeigen, dass eine hohe Montagedrehzahl die Belastbarkeit der Direktverschraubung reduziert. Indem die

Montagedrehzahl kurz vor Schraubenkopfaufgabe drastisch reduziert wird und das Anziehen der Schraube so langsam wie möglich erfolgt, kann dem entgegengewirkt werden. Des Weiteren zeigte sich, dass beim langsamen Anziehen der Schraube die Vorspannkraft über die Zeit weniger absinkt. Die Ergebnisse aus Kapitel 6.3.1 vertreten dabei den Kompromiss aus hoher Eindreh- und geringer Anziehgeschwindigkeit der gewindeformenden Schraube. Die hohe Eindrehgeschwindigkeit verkürzt dabei die Montagezeit und durch das langsame Anziehen der Schraube bleibt die vollständige Belastbarkeit erhalten sowie der Vorspannkraftabfall vergleichsweise gering.

Zur Zykluszeiteinsparung wird empfohlen die Schraube schnell in das Material einzudrehen und langsam bei unter 50 U/min vorzuspannen. Das händische Anziehen der Schraube, dessen Richtwert bei 30 U/min liegt [Ona83, S.37], ist im Falle einer nicht vorhandenen Drehzahlregelung von Schraubgeräten vorzuziehen.

Bei QGB-Steckschraubverbindungen entfällt der Gewindeformprozess, da die metrische Schraube in das Zusatzelement mit genormtem Anschlussgewinde geschraubt wird. Analog zu den Direktverschraubungen sollte dennoch das Aufbringen der Vorspannung langsam erfolgen, um die Vorspannkraftrelaxation gering zu halten.

Nachziehen

Am Beispiel des Nachziehens der Schraubverbindung und den erarbeiteten Nachziehintervallen wurde eine Variante aufgezeigt den Vorspannkraftabfall von Schraubverbindungen in hochgefüllten Holz-Polymer-Werkstoffen auszugleichen. Wie bereits aus dem Stand der Technik erarbeitet wurde, erfährt die Schraubverbindung in der ersten Stunde nach Aufbringen der Vorspannkraft den höchsten Vorspannkraftabfall. In diesem Zeitfenster sollte auch das Nachziehen erfolgen. Mit Hilfe des zwei- bis dreimaligen Nachziehens unmittelbar nach der Schraubmontage besitzen die Direktverschraubungen nach einem Monat eine um 6 - 8% höhere relative Vorspannkraft. Bezogen auf eine absolute Anfangsvorspannkraft von 6 kN relaxiert die Direktverschraubung nach einem Monat ohne Schraubennachzug auf 4,5 kN und mit Schraubennachzug auf 5 kN. Durch die höhere Restvorspannkraft kann je nach Anwendungs- und Belastungsfall die notwendige Verbindungsmittelanzahl reduziert bzw. das Wartungsintervall innerhalb der Nutzungsdauer vergrößert werden. Ein späteres Nachziehen der Schraubverbindung ist innerhalb der Nutzungsdauer nicht zwingend notwendig.

Anhand eines Beispiels wird nachstehend ein Spezialfall diskutiert, für den das Nachziehen der Schraube während der Montage sinnvoll ist. Die Randbedingungen sind hierfür ein begrenzter Bauraum, der eine Schraube mit dem Nenndurchmesser $d_1 = 6 \text{ mm}$ fordert sowie eine Nutzungsdauer von 10 Jahren in der die Mindestvorspannkraft von $F_{v_soll} = 5 \text{ kN}$ nicht unterschritten werden darf. Bild 7.5 stellt den auf eine 10-jährige Nutzungsdauer extrapolierten Vorspannkraftverlauf der in Kapitel 6.3.2 aufgeführten Messergebnisse für Direktverschraubungen in WPC dar. Die Extrapolation erfolgte mit Hilfe des angepassten Findleyansatzes [Tom00], der für diesen Werkstoff jedoch eine

fehlerbehaftete Näherung darstellt. Der Nachweis des Ansatzes war dabei nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die ohne Schraubennachzug montierten Direktverschraubungen (schwarze Kurven in Bild 7.5) relaxieren unter Berücksichtigung der Streuung bereits nach 1,7 bis 5,5 Jahre unter die definierte Vorspannkraft (grauer Bereich in Bild 7.5). Zu diesem Zeitpunkt ist ein wirtschaftlich unrentables Wartungsintervall durchzuführen, bei dem die Schrauben auf die Anfangsvorspannkraft nachgezogen werden müssen. Im ungünstigsten Fall ist bereits kurz vor 1,7 Jahren das Nachziehen notwendig, welches unter Umständen nach weiteren Betriebsjahren zu wiederholen ist. Die Vorspannkraft der mit Schraubennachzug montierten Direktverschraubungen (rote Kurven Bild 7.5) relaxiert innerhalb des definierten Nutzungszeitraumes von 10 Jahren nicht unter die Mindestvorspannkraft, sodass das Wartungsintervall entfällt. Das Vorspannen der Schraube auf eine höhere Montagevorspannkraft ist für diese Schraubengröße nicht zulässig, da das maximale Anzugmoment sonst überschritten würde und die Verbindung bereits während der Montage versagt. Bringt der Anwendungsfall für den Konstrukteur hingegen mehr Freiheiten mit sich, sind aus wirtschaftlicher Sicht größere Schraubendurchmesser bzw. eine größere Schraubenanzahl in der Verbindungsstelle der Nachziehmethode vorzuziehen.

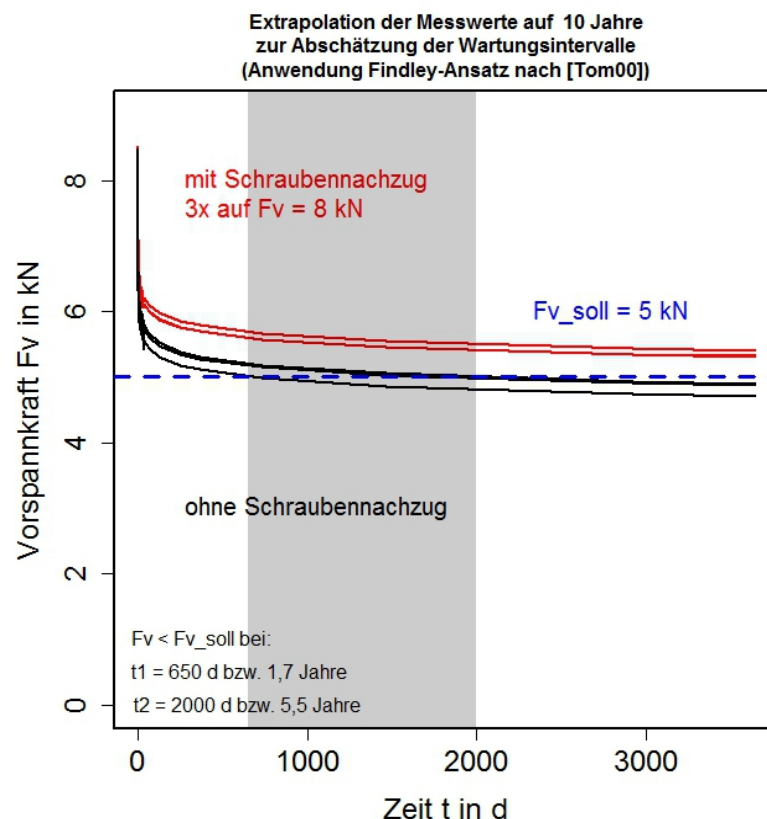


Bild 7.5: Extrapolierter Vorspannkraftverlauf für die Nutzungsdauer von 10 Jahren von nachgezogenen und nicht nachgezogenen Direktverschraubungen zur Abschätzung der Wartungsintervalle definierte Mindestvorspannkraft $F_{v_soll} = 5 \text{ kN}$. Extrapolation der Einzelmessungen aus Kapitel 6.3.2

Das Nachziehverfahren ist selbst mit einem einfachen Drehmomentenschlüssel an jedem Montageort realisierbar. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es dagegen bei einer hohen Schraubenanzahl ungeeignet, da unweigerlich die Montagezeit um ein Vielfaches zunimmt. Sinnvollerweise müssen die durch das Nachziehen eingesparten Verbindungsmittel und Wartungsintervalle dem montagetechnischen Mehraufwand gegengerechnet werden. Der größte Effekt stellt sich sowohl für die Direktverschraubung als auch für die QGB-Steckschraubverbindung bereits nach dem ersten Schraubennachzug ein, wird der einmalige Schraubennachzug als technologisch-wirtschaftlicher Kompromiss vorgeschlagen. Ist der Bauraum im Anwendungsfall uneingeschränkt verfügbar, so sind größere Schraubendurchmesser und eine größere Schraubenanzahl je Verbindungsstelle dem mehrmaligen Nachziehen während der Montage vorzuziehen.

7.4 Bewertung der Einflussfaktoren

7.4.1 Einfluss der Anisotropie auf die Einschraubrichtung

Die Versuche haben einen werkstoffabhängigen Einfluss der Einschraubrichtung auf die maximal übertragbare Vorspannkraft aufgezeigt. Bei allen Versuchswerkstoffen werden in Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion größere maximal übertragbare Vorspannkkräfte erreicht. Die Richtung mit der geringsten Tragfähigkeit ist bei den Untersuchungswerkstoffen in Scheibenrichtung senkrecht zur Extrusion aufgetreten. In Tabelle 7.2 und 7.3 sind die prozentualen Abweichungen der maximalen Tragfähigkeit für die Einschraubrichtungen zusammengefasst. Die S-PE Richtung, welche die geringste Tragfähigkeit für Verbindungsmittel besitzt, ist hierbei auf 100% normiert. Die Tragfähigkeitsabweichung wird in der konstruktiven Gestaltung der Verbindungsstellen in Kapitel 7.1 berücksichtigt. Für die Dimensionierungsempfehlung wurde die Einschraubrichtung mit der geringsten Tragfähigkeit zugrunde gelegt, sodass die Verbindungen in den anderen Einschraubrichtungen überdimensioniert sind. Das ist im Sinne einer einfachen Montage im industriellen Umfeld notwendig, um bereits bei der Konstruktion spätere Montagefehler auszuschließen.

Tabelle 7.2: Prozentuale Abweichung der maximal übertragbaren Vorspannkraft beim Überdrehen in Abhängigkeit der Einschraubrichtung für Direktverschraubungen

Direktverschraubung	$l_E = 14 \text{ mm}$			$l_E = 22 \text{ mm}$		
Einschraubrichtung	P-SE	S-PE	S-SE	P-SE	S-PE	S-SE
WPC-1	104,2%	100%	100%	-	100%	99%
WPC-5 (Diele)	108,4%	100%	99,9%	-	100%	105%
WPC-5 (Bohle)	113,7%	100%	98,2%	127,7%	100%	107,4%
WPC-6	118,6%	100%	109,5%	-	100%	123,9%

Tabelle 7.3: Prozentuale Abweichung der Auszugskraft in Abhängigkeit der Einschraubrichtung für QGB-Steckschraubverbindungen

	QGB-Steckschraubverbindung		
Einschraubrichtung	P-SE	S-PE	S-SE
WPC-1	-	100 %	108%
WPC-5	-	100 %	113%
WPC-6	-	100 %	103,5%

7.4.2 Einfluss der Materialfeuchtigkeit

In Abhängigkeit des Umgebungsklimas nimmt das WPC-Material Feuchtigkeit auf bzw. gibt sie ab und unterliegt dem Quell- und Schwindverhalten. Im Vergleich zu anderen Holzwerkstoffen läuft der Wassertransportmechanismus bei WPC um ein vielfaches langsamer ab [Bur11]. So ist das Erreichen einer Ausgleichsfeuchte im WPC fraglich bzw. mit einer sehr langen Auslagerungszeit von mehreren Wochen bis Jahren verbunden [Bur11]. Die analytische Beschreibung der Wasserabsorption unterliegt vielen unberechenbaren Einflussfaktoren und kann daher nur als Näherung verstanden werden. Um den Einfluss der Materialfeuchtigkeit innerhalb einer vertretbaren Versuchszeit auf die Montageparameter und den Vorspannkraftverlauf abzubilden, wurde die Konditionierung der Kaltwasserlagerung sowie der Darrtrocknung angewendet und der Konditionierung bei Raumklima gegenübergestellt.

Auf den Montageprozess

Die Ergebnisse zum Sorptionsverhalten des Werkstoffes aus Kapitel 6.4.2 zeigen, dass sich im Material ein Sorptionsbereich ausbildet, der sich durch einen hohen Feuchtegehalt (von 16%) vom nahezu trockenen Kernbereich (Feuchtigkeit 1%) des Materials abgrenzt. Der grundsätzliche Sachverhalt, dass mit steigender Materialfeuchtigkeit die mechanische

Belastbarkeit von WPC sinkt, ist ebenfalls auf die Verbindungsstelle zutreffend. Voraussetzung dieser Minderung ist jedoch, dass ein direkter Kontakt der tragenden Fläche des Verbindungsmittels zur Umgebungsfeuchte besteht. Ist dieser Kontakt nicht gegeben, tritt keine Schwächung ein. Die Höhe der Tragfähigkeitsminderung ist dabei abhängig von der Lage und Größe des sich einstellenden Sorptionsbereiches und der direkten Überschneidung zur tragenden Fläche des Verbindungsmittels.

Bei QGB-Steckschraubverbindungen bildet sich unabhängig von der Profilgeometrie stets ein festigkeitsmindernder Sorptionsbereich aus, der die tragende Fläche des Quergewindebolzens um die Sorptionstiefe in Dickenrichtung auf die tragende Bauteildicke t_{red} reduziert (Bild 7.6). Die maximal übertragbare Vorspannkraft von QGB-Steckschraubverbindungen reduziert sich bei der Extrembedingung Kaltwasserlagerung um 12%.

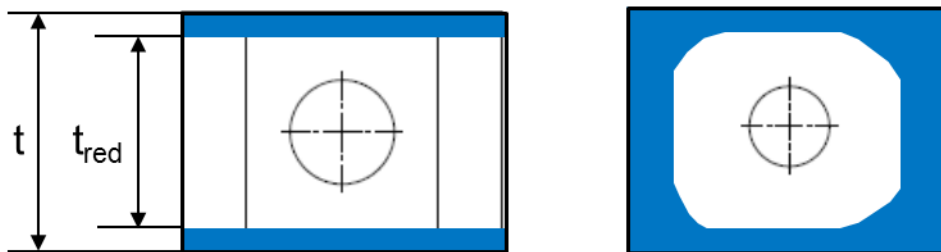


Bild 7.6: Schematische Querschnittsdarstellung des Sorptionsbereiches und der Lage des Verbindungsmittels für QGB-Steckschraubverbindung (links) und Direktverschraubung (rechts)

Im Gegensatz dazu hat der festigkeitsmindernde Sorptionsbereich auf die Montage der Direktverschraubung unter Berücksichtigung der Bauteildimensionierung des Vollmaterials keinen Einfluss. Er liegt außerhalb der tragenden Verankerungsfläche des Gewindes (Bild 7.6). Im Fall einer extrudierten Einschraubstelle, die nach der Extrusion direkten Luftkontakt besitzt, muss dieser Effekt jedoch berücksichtigt werden. Dabei kann eine Abminderung der maximal übertragbaren Vorspannkraft beim Einschrauben in Extrusionsrichtung um max. 27% eintreten.

Die vollständige Wasserbadlagerung bzw. eine Luftfeuchtigkeit von nahezu 100% ist im Anwendungsfeld der internen Fördertechnik und in Produktionsstätten nicht zu erwarten. Gleichzeitig wäre eine Außenlagerung des Materials für den späteren Einsatz von lasttragenden Bauteilen grob fahrlässig und ist stets zu vermeiden. Diskussionsbedarf bleibt bestehen, über welchen Zeitraum das Material einem bestimmten Klimaszenario ausgesetzt ist und welchen Schwankungen es unterliegen muss, sodass sich ein ausreichend großer Sorptionsbereich ausbilden kann, der die tragende Fläche des Verbindungsmittels überschneidet.

Um die unbeherrschbare Materialkonditionierung zu umgehen und die größtmögliche Belastbarkeit der Schraubverbindung zu realisieren, sollten für tragende Anwendungen

stets produktionsfrische WPC-Halbzeuge eingesetzt werden. Des Weiteren wird empfohlen die Lagerzeit der Vollprofile zwischen spanender Bearbeitung der Einschraubstelle und Montage auf drei Monate zu begrenzen. Diese Angabe bezieht sich auf die Mindestbauteildicke von $t = 15 \text{ mm}$. Innerhalb dieses Zeitraumes ist für Direktverschraubungen keine Reduzierung der maximal übertragbaren Vorspannkraft während der Montage zu erwarten. Bei QGB-Steckschraubverbindungen ist im schlimmsten Fall bei einer sehr hohen Feuchtigkeit für den angegebenen Zeitraum mit einer Minderung der maximal übertragbaren Vorspannkraft von 12% zu rechnen.

Auf den Vorspannkraftverlauf im Betriebszustand

Die Vorspannkraft von Schraubverbindungen in WPC unterliegt, analog zur Feuchtigkeitsaufnahme und der damit einhergehenden Dimensionsänderung, Schwankungen. So haben die Untersuchungen zum Vorspannkraftverlauf in Kapitel 6.5.3 gezeigt, dass QGB-Steckschraubverbindungen keine und die Direktverschraubungen hingegen deutliche Schwankungen in Abhängigkeit des Umgebungsklimas besitzen.

Die Ursache ist in der Wirkung der Umgebungsfeuchte auf die Nachgiebigkeits- und Dimensionsänderung in der jeweiligen Schraubverbindung zu suchen, welche die Verbindungssteifigkeit in Direktverschraubungen erhöht und in QGB-Steckschraubverbindungen gegenläufig beeinflusst.

Mittels unterschiedlicher Probenvorkonditionierung und Auslagerung der Schraubverbindungen bei ein und demselben Klima wurden die Szenarien

- die Schraubverbindung relaxiert unter stetiger Aufnahme von Feuchtigkeit sowie
- die Schraubverbindung relaxiert bei nahezu gleichbleibender Materialfeuchtigkeit

abgebildet. Die dabei abgebildete Zunahme der Materialfeuchtigkeit lehnte sich an die in Produktionsstätten auftretende Feuchtigkeitsaufnahme bei einer maximalen Luftfeuchtheitsdifferenz von 50% in den Übergangsmonaten an.

Aus der Gegenüberstellung der Vorspannkraftrelaxationskurven in Kapitel 6.5.3 lässt sich für die Übergangsmonate, respektive der Versuchszeit von 3,5 Monaten für Direktverschraubungen eine Differenz von 10% ermitteln. Diese Differenz kann als Faktor für die Beeinflussung des Vorspannkraftabfalls über die Jahresscheibe für die Berechnung der Anfangsvorspannkraft hinzugezogen werden. Unter Voraussetzung, dass die Desorption in gleichem Maße wie die abgebildete Absorption stattfindet, ist gleichermaßen ein Vorspannkraftabfall von 10% beim Übergang von hoher Umgebungsfeuchte auf geringe Umgebungsfeuchte über die Jahresscheibe zu erwarten. Aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten sollte dieser Grenzfall in der Schraubverbindung noch abgebildet und verifiziert werden. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich die Angaben ausschließlich auf die Einschraubrichtung parallel zur Extrusion beziehen. Weiterführende Arbeiten sollten an dieser Stelle anknüpfen, um alle weiteren Einschraubrichtungen zu berücksichtigen. Beispielsweise ist in Plattenrichtung senkrecht zur Extrusion aufgrund

des größten Quellmaßes mit einem umgekehrten Effekt in QGB-Steckschraubverbindungen und einem verstärkten Effekt in Direktverschraubungen zu rechnen. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der begrenzten Dicke handelsüblicher Halbzeuge die Einschraubrichtung in Plattenebene senkrecht zur Extrusion mit QGB-Steckschraubverbindungen nur bedingt umsetzbar sind.

7.5 Konstruktionsbeispiele

Einschraubverbindungen sind relevant für die konstruktive Ausführung von Eckstößen in Gestellbaugruppen und dem Einbau von Anbauteilen in bestehenden Anlagen. Teilweise ergeben sich besondere Anforderungen an die Wiederholmontage und der Nachstellbarkeit der Verbindung, welche bei den folgenden Konstruktionsbeispielen Berücksichtigung finden. Exemplarisch sind die Eckverbindung eines Vierkantprofils und eines Rundprofils aufgeführt. Beide Profile sind als Halbzeuge handelsüblich verfügbar. Als Beispiel für eine Aufhängung ist die Anbindung des WPC-Trag- und Gleitelementes an das Stahlgestell des Hängefördersystems dargestellt.

Eckverbindung Vierkantprofil

Bild 7.7 stellt die gesteckte und zweifach verschraubte Eckverbindung eines Vierkantprofils mit quadratischen Querschnitt 40 mm x 40 mm dar.

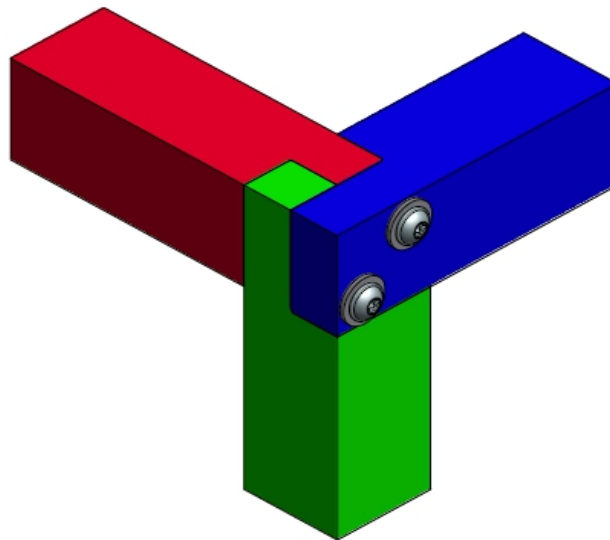


Bild 7.7: Eckverbindung eines Vierkantprofils

Die Eckverbindung verfügt über einen hohen Formschlussanteil. Die sich gegenseitig abstützenden Bauteile sind verdrehsicher angeordnet. Durch die doppelte Verschraubung der Bauteile ist die vollständige Verdrehsicherung gegeben. Die Schraubverbindung ist

mit der gewindeformenden Schraube für Thermoplaste (Fa. Schrieber STS plus) als Direkt-verschraubung ausgeführt. Die konstruktiven Parameter sind:

- Schraubennendurchmesser $d_1 = 6 \text{ mm}$
- Kernlochdurchmesser $d_K = 5 \text{ mm}$
- Einschraublänge $l_E = 30 \text{ mm}$
- Bauteilbreite $B = 20 \text{ mm}$.

Die Schrauben sind von außen zugänglich angebracht, sodass ein Nachspannen der Verbindung möglich ist.

Eckverbindung für Rundprofile 30 mm

In Bild 7.8 sind zwei Varianten einer Eckverbindung für WPC-Rundprofile aufgeführt. In der linken Darstellung ist die Verbindung als Direktverschraubung und in der rechten Darstellung als QGB-Steckschraubverbindung ausgeführt. Letzteres ermöglicht dabei die Wiederholmontage.

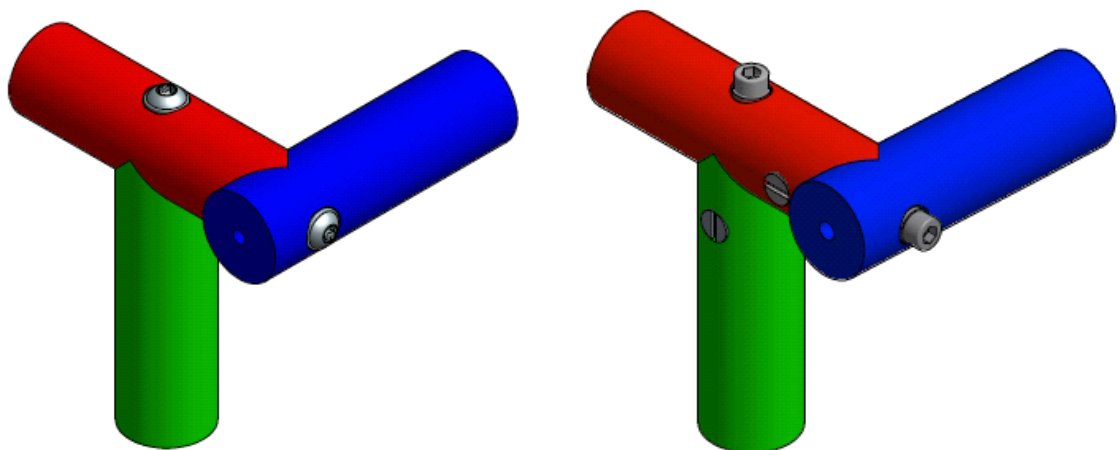


Bild 7.8: Eckverbindung als Direktverschraubung und als QGB-Steckschraubverbindung von WPC-Rundprofilen

Die Eckverbindung ist gesteckt und zusätzlich mit zwei Schrauben verschraubt. Die Verbindung ist durch die Schraubenzugänglichkeit nachstellbar. Der Abstand zwischen Vertikalstrebe und horizontaler Ecke kann nicht verhindert werden, sondern nur auf ein Minimum reduziert werden. Hierfür muss die Einschraublänge bzw. die Eindringtiefe des QGB reduziert werden. Folgende konstruktive Parameter liegen den Verschraubungen zugrunde:

- Schraubennendurchmesser $d_1 = 6 \text{ mm}$
- Kernlochdurchmesser $d_K = 5 \text{ mm}$
- Einschraublänge $l_E = 30 \text{ mm}$

- Maschinenschraube M6 x 40
- QGB D = 10 mm, L = 30 mm
- e = 25 mm

Aufhängung des WPC-Trag- und Gleitelementes im Hängefördersystem [Sch17]

Bild 7.9 stellt die Aufhängung des WPC-Trag- und Gleitelementes an das Stahlgestell im Hängefördersystem dar. Die Aufhängung ist über den Quergewindebolzen und einer Gewindestange ausgeführt.

Aufgrund der Verfügbarkeit des Verbindungsmittels wird der Bolzen D12, L35, M8 eingesetzt. Die Eindringtiefe ist mit 50 mm größer als die empfohlene Eindringtiefe, damit der Bolzen außerhalb der Bindenaht im Strukturprofil liegt. Das U-förmige Adapterstück, aus WPC gefertigt, ermöglicht eine plane Anschlussfläche zum Stahlgestell. Mit Hilfe einer aufgeschraubten Mutter wird das Profil über den Adapter an das Gestell leicht vorgespannt.

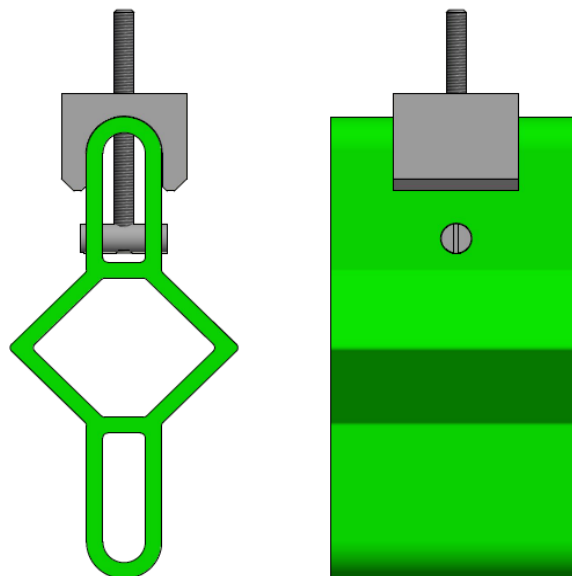


Bild 7.9: Aufhängung des WPC- Trag- und Gleitprofils an das Gestell im Hängefördersystem aus [Sch17]

8 Zusammenfassung und Ausblick

Entsprechend des Anwendungsfeldes hochgefüllter WPC-Extrusionsprofile als Gestellsysteme und Anlagenkomponenten in der Intralogistik sind vorgespannte Schraubverbindungen für Baugruppen aus den Halbzeugen notwendig. Im Fokus der Arbeit stehen die QGB-Steckschraubverbindung und die Direktverschraubung mit gewindeformenden Schrauben in der Ausführung als einschnittige Einschraubverbindung. WPC-Extrusionsprofile sind durch ein viskoelastisches Verformungsverhalten sowie anisotrope und hygroskopische Eigenschaften gekennzeichnet, die den Fügeprozess und das Tragverhalten der Schraubverbindung beeinflussen. Das Ziel der Untersuchung war es, die werkstofftypischen und konstruktiven Einflussfaktoren von hochgefüllten WPC-Extrusionsprofilen auf den Fügeprozess und die Verbindungseigenschaften vorgespannter Einschraubverbindungen zu ermitteln. Als Zielkriterium wurde die größtmögliche Lastausnutzung der Schraube und eine geringe Vorspannkraftrelaxation über die gesamte Beanspruchungszeit festgelegt. Auf Basis der Ergebnisse wurden Empfehlungen zur konstruktiven Gestaltung der Verbindungen und Montagehinweise abgeleitet.

Untersucht wurden ausschließlich handelsübliche, extrudierte WPC-Vollprofile mit 56 Gew.-% bis 75 Gew.-% holzbasierendem Füllstoff. Es wurden definierte Montageversuche mittels programmierbarem EC-Schraubgerät und integrierter Vorspannkraftmessung durchgeführt. Die angewendeten Montageversuche waren der Überdrehversuch, der Anzugversuch, der Weiterdrehversuch und der Nachziehversuch. Zur Charakterisierung der Verbindungseigenschaften wurden der statische Auszugsversuch mit / ohne Vorspannkraft sowie kontinuierliche Vorspannkraftrelaxationsmessungen unter langzeitruhender Beanspruchung unter verschiedenen klimatischen Szenarien durchgeführt.

In den Versuchsreihen zur konstruktiven Verbindungsgestaltung der beiden Verschraubungsarten wurden die technisch vorteilhaften Parameter nach den Kriterien der maximal übertragbaren Vorspannkraft, maximaler Auszugfestigkeit und der maximalen Momentendifferenz zwischen Eindreh- und Überdrehmoment erarbeitet. Für die Direktverschraubung mittels der Spezialschraube für Thermoplaste sind das die Parameter:

- Kernlochdurchmesser $d_K = 0,8 \dots 0,85 d_1$
- Einschraublänge $l_{E_{max}} = 6 \dots 7 d_1$
- Bauteilbreite, Bauteildicke $B = t \geq 2,5 d_1$

Für die QGB-Steckschraubverbindung mit den technisch vorteilhaften Bolzendurchmessern von $D_1 = 10$ mm und $D_1 = 12$ mm sollte das e/D_1 -Verhältnis werkstoffabhängig bei 2,5 bis 3 und das w/D_1 -Verhältnis zwischen 3 bis 5 liegen. Da der Richtungseinfluss

werkstoffabhängig ausgeprägt ist, nimmt er unterschiedlich stark Einfluss auf die konstruktiven Parameter. Im Sinne einer montagefreundlichen Verbindungsgestaltung und Handhabung im Montagefall wurde der Richtungseinfluss bezüglich der konstruktiven Parameter weitestgehend vereinheitlicht.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Werkstoffanisotropie auf die Verbindungseigenschaften in den Einschraubrichtungen Scheibe parallel zur Extrusion (S-PE), Platte senkrecht zur Extrusion (P-SE) und Scheibe senkrecht zur Extrusion (S-SE) zeigten einen werkstoffabhängigen Einfluss auf. Grundsätzlich werden in P-SE-Richtung die größten maximal übertragbaren Vorspannkkräfte erreicht.

Des Weiteren zeigten die Montageversuche zur Einschraub- und Anziehggeschwindigkeit der Schraubverbindung, dass die Schraube schnell (bis 600 U/min) in das Material eingeschraubt werden kann. Das Aufbringen der Vorspannkraft sollte jedoch so langsam wie möglich erfolgen, um den Vorspannkraftverlust so gering wie möglich zu halten.

Das Nachziehen der Schraubverbindung mit den entsprechenden Nachziehintervallen wurde als Möglichkeit aufgezeigt, bereits während der Montage der Vorspannkraftrelaxation entgegenzuwirken. Bereits der einmalige bis dreimalige Schraubennachzug wirkt sich positiv auf den Vorspannkraftabfall aus. Dabei ist der Effekt in Direktverschraubungen von WPC-Profilen deutlich stärker ausgeprägt als in QGB-Steckschraubverbindungen. Die Nachziehmethode sollte aus wirtschaftlichen Gründen jedoch nur angewendet werden, insofern Einschränkungen an die Bauraumgröße gestellt werden, die den Einsatz größerer Schraubennennendurchmesser und Schraubenanzahlen untersagen.

Der Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf den Montageprozess wurde mit Hilfe der Kaltwasserlagerung und Darrtrocknung abgebildet. Über die mikroskopische Analyse sowie der lokalen Feuchtebestimmung nach Karl Fischer konnte der Wassersorptionsbereich in den Werkstoff klar abgegrenzt werden. Grundsätzlich nimmt die maximal übertragbare Vorspannkraft und die Tragfähigkeit mit zunehmender Materialfeuchtigkeit ab. Ein notwendiges Kriterium der Schwächung ist, dass die tragende Fläche des Verbindungsmittels mit dem Wassersorptionsbereich im WPC korreliert. Bei QGB-Steckschraubverbindungen und der Direktverschraubung von Hohlprofilen mit extrudierter Einschraubstelle ist dies stets der Fall und beträgt 12% bzw. 27%. Bei Direktverschraubungen von WPC-Vollmaterial ist der Effekt aufgrund der notwendigen Bauteildimension zu vernachlässigen. Um die in der Praxis ungewisse Materialkonditionierung zu eliminieren, sollten stets produktionsfrische, nahezu darrtrockene WPC-Halbzeuge verwendet werden.

Unterliegt die Schraubverbindung im Betriebszustand Schwankungen der Umgebungsfeuchtigkeit, so ändert das WPC-Bauteil seine Dimensionen. Die Schraubverbindung erfährt dadurch einen Vorspannkraftverlust durch Schwinden bzw. einen Vorspannkraftzuwachs durch Quellen. Die Untersuchungsreihe zum Einfluss der Material-

feuchtigkeit auf den Vorspannkraftverlauf verspannter Schraubverbindungen zeigte, dass die Vorspannkraft in QGB-Steckschraubverbindungen keinen und in Direktverschraubungen hingegen Schwankungen unterliegt. Es ist mit einer Vorspannkraftänderung von 10% über die Jahresscheibe zu rechnen, welche zusätzlich zum Vorspannkraftverlust infolge des viskoelastischen Verformungsverhaltens eintritt. Ein wesentlicher Kritikpunkt ergibt sich an dieser Stelle, da von der abgebildeten Absorption auf die Desorption geschlossen worden ist. Aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten sollte die Desorption und damit der Vorspannkraftverlust durch Schwinden in der vorgespannten Schraubverbindung noch abgebildet werden.

Des Weiteren sollte die gesamte Problematik des Temperatureinflusses in zukünftige Arbeiten untersucht werden. Da neben der thermischen Materialschädigung und der Beeinflussung der Viskoelastizität die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Schraube und WPC-Bauteil zu einem verstärkten Vorspannkraftverlust führen.

Die im Rahmen der Arbeit dargestellten Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den Schraubennendurchmesser $d_1 = 6$ mm. Anknüpfende Arbeiten sollten die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere, für den Maschinenbau relevante Schraubengrößen, z.B. M8 in WPC nachweisen und das Lockern der Schraubverbindung durch dynamische Beanspruchung einbeziehen.

Die Ergebnisse zum Nachziehen der Direktverschraubung zeigten, dass sich lose Holzpartikel im Bereich der Gewindeflanke lokal verdichten und der Formschlussanteil vergrößert wird. Für scherlochleibungsbeanspruchte Verbindungen könnte das Nachziehen ebenfalls Vorteile verschaffen. Hier sollten weiterführende Arbeiten anknüpfen. Darüberhinaus ergeben sich Anschlusspunkte für vorgespannte Schraubverbindungen in nachgiebigen Holzwerkstoffen. Die Einbeziehung des Fügeprozesses zur Auslegung des Schraubenanzugsmomentes in vorgespannten Schraubverbindungen sowie ein wirtschaftlich vertretbarer Nachziehrhythmus ist für den Holzwerkstoff Wood Veneer Composite (WVC) in maschinenbautechnischen Anwendungen notwendig. Entsprechende Untersuchungen sind hier fortzuführen.

9 Literaturverzeichnis

- [Aon14] Aondio, Patrik: Berechnung von Zylinderschalen aus Holz und Holzwerkstoffen unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation. Dissertation, TU München, 2014.
- [Aur01] Aurich, T.: Spritzgießen und resultierende Verbundeigenschaften von flachsfaserverstärktem Polypropylen. Dissertation. TU Chemnitz. 2001.
- [Ayr10] Ayrilmis, N.; et al.: Flat-pressed Wood Plastic Composite as an Alternative to conventional wood-based Panels. In: Journal of Composite Materials. 2010. S. 1 –10.
- [Bas05] Bastian, M.; et al.: Einfluss des Haftvermittler. In: Kunststoffe. 2005. S. 49 – 53.
- [Bau93] Bauer, G.: Vorspannkraft erzeugen. In: ICS Handbuch Automatische Schraubmontage. Hans-Herbert Mönnig Verlag, Iserlohn 1993, S. 396 – 402.
- [Bau97] Bauer, G.; et al.: Automatische Schraubmontage Schraubsysteme. Deutscher Schraubenverband e.V. Hagen. Hans-Herbert Mönnig Verlag, Iserlohn, 1997, 2. Ausgabe, S. 392 – 464.
- [Bej05] Bejtka, I.: Verstärkung von Bauteilen aus Holz mit Vollgewindeschrauben. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2005.
- [Ben13] Benthien J.; Ohlmeyer, M.: Thickness swelling and water absorption of WPC after immersion in cold and boiling water. In: Eur. J. Wood Prod. 71/ 2013, S.437 – 442.
- [Bha06] Bhattacharyya, D.; et al.: Stress Relaxation of Woodfiber-Thermoplastic Composites. In: J. Appl. Polym. Sci. 102/2006. S. 401 – 407.
- [Bla03] Blaß, H. J.; Bejtka, I.: Selbstbohrende Holzschrauben und ihre Anwendungsmöglichkeiten. Holzbau Kalender. 2003.
- [Bla99] Blaß, H. J.; Siebert, W.: Ermittlung der Einschraub- und Bruchmomente von Schrauben. Forschungsbericht. Versuchsanstalt für Stahl Holz und Steine, Universität Fridettriciana Karlsruhe. 1999
- [Ble04] Bledzki, A. K.; Faruk, O.: Creep and impact properties of wood fibre- polypropylene composites: influence of temperatur and moisture content. In: Composites Science and Technology, 64/2004, S. 693 – 700.

- [Bou15] Boukettaya, S.; et al.: Water absorption and stressrelaxation behavior of PP/ date palm fiber composite materials. In: Design and Modeling of Mechanical Systems. 2015. S. 437-445.
- [Bri11] Brinkmann, T.: Handbuch Produktentwicklung mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag München Wien. 2011. ISBN 978-3-446-42243-8.
- [Bro91] Bröker, F.-W.; Krause, H. A.: Orientierende Untersuchungen über das Haltevermögen dynamisch beanspruchter Holzschrauben. In: Holz als Roh- und Werkstoff. 49/1991. S381-384.
- [Bue09] Bürkle, E.; et al.: Energieeffiziente Verarbeitung naturfaserverstärkter Kunststoffe. In: Kunststoffe 2/2009. S. 39 – 44.
- [Bur11] Burgstaller, C.: Wassersorption – Wasseraufnahme von Wood Plastic Composite. Bericht aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 43/2011.
- [Bur70] Burmeister, A.; Hoffmann, A.: Schraubenhaltevermögen von Kiefern- und Fichtenholz unter langdauernder statischer und dynamischer Belastung. In: J. Holzbearbeitung. 1970, S. 9 – 11.
- [Car15] Carus, M.; et al.: Bioverbundwerkstoffe Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2015.
- [Cas85] Cassens, D.; Eckelman, C.: Face holding strength of threaded metal inserts in reconstituted wood products. In: Forest Prod. J. 35/1985. S. 18 – 22.
- [Cha08] Chaharmahali, M.; et al.: Mechanical Properties of Wood Plastic Composite Panels made from Waste Fiberboard and Particleboard. In: Polymer Composites, 2008, S. 606 – 610.
- [Che10] Cheng, Q.; Shaler S.: Moisture movement in wood polypropylene composites. In: Eur. J. Wood Prod. 68/2010, S.463 – 468.
- [Cho02] Chow, P.; et al.: Fasteners resistance of non-woven and melt-blended composite panels made from cornstalk fibers and recycled plastics. 4th International Wood and Natural Fibre Composite Symposium. 2002. Kassel.
- [Def10] Defoirdt, N.; et al.: Moisture dynamics of WPC and the impact on fungal testing. In: International Biodeterioration & Biodegradation. 64/2010. S. 65 – 72.
- [DIN440] DIN 440 R: Scheiben für Holzkonstruktionen, Rundloch. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2001.
- [DIN1478] DIN EN ISO 1478: Blechschraubengewinde. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 1999.

- [DIN1382] DIN EN 1382: Holzbauwerke – Prüfverfahren – Ausziehtragfähigkeit von Holzverbindungsmittein. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2016.
- [DIN317] DIN EN 317: Spanplatten und Faserplatten; Bestimmung der Dickenquellung nach Wasserlagerung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 1993.
- [DIN322] DIN EN 322: Holzwerkstoffe; Bestimmung des Feuchtegehaltes. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 1993.
- [DIN13] DIN 13-1: Metrisches ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Teil 1: Nennmaße für Regelgewinde; Gewinde – Nenndurchmesser von 1 mm bis 68 mm. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 1999.
- [DIN320] DIN EN 320: Spanplatten und Faserplatten – Bestimmung des achsenparallelen Schraubenauszieh Widerstand. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2011.
- [DIN7998] DIN 7998: Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 1975.
- [DIN97] DIN 97: Senk-Holzschrauben mit Schlitz. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2016.
- [DIN1052] DIN 1052: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2004.
- [DIN1995] DIN EN 1995- 1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauwerken – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2010.
- [DIN571] DIN 571: Sechskant-Holzschrauben. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2016.
- [DIN96] DIN 96: Halbrund- Holzschrauben mit Schlitz. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2016.
- [DIN13446] DIN EN 13446: Holzwerkstoffe – Bestimmung des Haltevermögens von Verbindungsmittein. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2002.
- [DIN15534] DIN EN 15534: Verbundwerkstoffe aus cellulosehaltigen Materialien und Thermoplasten (üblicherweise Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) oder Naturfaserverbundwerkstoffe (NFC) genannt) Teil 1 – 5. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Beuth-Verlag, 2017.

- [Dra99] Dratschmidt, F.: Zur Verbindungstechnik von glasfaserverstärktem Polyamid. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1999.
- [DVS2241] DVS 2241-1: Direktverschraubung von Bauteilen aus thermoplastischen Kunststoffen. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. Beuth Verlag, 2016.
- [Ech69] Echenique-Manrique, R.: Stress relaxation of wood at several levels of strain. In: Wood Science and Technology. Vol 3/ 1969. S. 49 – 73.
- [Eck12] Eckardt, R.: Untersuchungen an Verbindungselementen für Holzkonstruktionen im Maschinen- und Anlagenbau. Dissertation, TU Chemnitz, 2012.
- [Eck14] Eckardt, R.; et al.: Logistiksysteme in der Automobilproduktion aus Holzwerkstoffen. 10. Symposium Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen, naro.tech, Erfurt, 2014.
- [Eck74] Eckelman, C. A.: Which screw holds best? In: Furniture Design & Manufacturing magazine. 09/1974.
- [Eck75] Eckelman, C. A.: Screwholding Performance in hardwoods and Particle board. In: Forest products Journal, Vol. 25, 1975, S. 30 – 35.
- [Eck88] Eckelman, C. A.: The withdrawal strength of screws from a commercially available medium density fiberboard. In: Forest Products Journal. Vol 38. 1988, S. 21 – 24.
- [Eck10] Eckardt, R.; et al.: Neue Bauweisen in der Intralogistik durch Holzverbundwerkstoffe – Verbindungselemente für dynamische Belastungen. In: Logistic Journal. 2010.
- [Egg14] N. N.: Firma Egger. Technisches Datenblatt Spanplatten. 2014.
- [Ehr04] Ehrenstein, G. W.: Handbuch Kunststoff Verbindungstechnik. Carl Hanser Verlag, München, 2004.
- [Ehr07] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, München, 2007.
- [Ehr11] Ehrenstein, G. W.: Polymerwerkstoffe Struktur – Eigenschaften – Anwendung. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [Eic09] Eichhorn, S.; et al.: Charakterisierende Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von WPC. In: Tagungsband Technomer Chemnitz, 2009.
- [Eic13] Eichhorn, S.; et.al.: Entwicklung eines kompletten Trag- und Gleitprofils aus WPC für ein Hängefördersystem. In: Tagungsband Technomer Chemnitz, 2013.

- [Eic16] Eichhorn, S.; et al.: Verwendung von Holzwerkstoffen in Fördertechnik der Automobilfertigung. In: 17. Holztechnologisches Kolloquium Dresden, 04/2016.
- [Eic12a] Eichhorn, S.; et al.: Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in der Intralogistik durch neue Systemkomponenten. VPP. 2012.
- [Ejo08] N.N., Ejot: EJOT IFF – Befestigungstechnik für das Fenster. 2008.
- [Ejo15] N.N., Die EJOT Delta PT® Schraube Berechenbar mehr Leistung in thermoplastischem Kunststoff. Internetpräsentation Firma EJOT. Zugriff 2015.
- [Erd03] Erdil, Y.; et al.: Withdrawal and bending strength of dowel-nuts in plywood and oriented strandboard. In: Forest Products Society, 53/2003, S. 54 – 57.
- [Erd02] Erdil, et.al.: Holding strength of screws in Plywood and oriented strandboard. In: Forest Products Society, 52/2002, S. 55 – 62.
- [Erh93] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. Carl Hanser Verlag München Wien.1993
- [Fal01] Falk, H., et al.: Performance of fasteners in wood flour-thermoplastic composite panels. In: Forest Products Journal, 51/2001, S. 55 – 61.
- [Fan15] N. N.: Firmenschrift FANO: Montageanleitung Wood Plastic Composite. 2015.
- [Fib19] N. N.: Internetpräsentation der Firma FKUR. Werkstoff Fibrolon®. Unter <https://fkur.com/marken/fibrolon/>. Zugriff 2019.
- [Fre10] Frese, M.; et al.: Modelle für die Berechnung der Ausziehtragfähigkeit von selbstbohrenden Holzschrauben. In: Eur. J. Wood Prod. 68/2010. S. 373 – 384.
- [Fri05] Friedrich, H.: Werkstofftechnische Anforderungen an Verbindungselemente für die Direktverschraubung. In: MP Materialprüfung. 47/2005. S. 487 – 495.
- [Gat09] Gates, J. C.: Screw withdrawal strength in 9 Wood's assemblies. Test Evaluation Report. Oregon Wood Innovation Center. 2009.
- [Geh10] Gehri, E.: Schraubenverbindungen für Laubholzkonstruktionen. 16. Internationales Holzbau-Forum, 2010.
- [Goz08] Gozdecki, C. et al.: Study of the screw withdrawal capacity in wood-polymer composites exposed to the accelerated ageing process. In: Forestry and Wood Technology, 65/2008. S. 84 – 87.

- [Goz11] Gozdecki, C.; et al.: Effect of the wood particle size on screw withdrawal and lateral resistance of wood-polymer composites. In: Forestry and Wood Technology, 74/2011. S.86 – 90.
- [Gro93] Großberndt, H.; et al.: Automatische Schraubmontage. 1. Auflage. ICS Handbuch, Mönnig Verlag, Iserlohn, 1993.
- [Gue07] Gülser, C. et al.: Nail and screw withdrawal strength of laminated veneer lumber made up hardwood and softwood layers. In: Construction and Building Materials 21/2007, S. 894 – 900.
- [Guo10] Guo, J.; et al.: Wood Plastic Composite Produced by nonmetals from pulverized waste printed circuit boards. In: Environ. Sci. Technol. 44/2010. S. 463 – 468.
- [Haf11] Haftkhani, A. R.; et al.: Investigation on withdrawal resistance of various screws in face and edge of wood-plastic composite panel. In: Materials and Design, 32/2011. S. 4100 – 4106.
- [Haf11a] Haftkhani G.; et al.: Lateral resistance of joints made with various screw in commercial wood plastic composites. In: Material and Design, 32/2011, S. 4062 – 4068.
- [Han13] Hansmann, H., et al.: Vergleich unterschiedlicher Verfahren zur Herstellung von WPC- VuV-WPC. Forschungsbericht FNR 22041811. 2013.
- [Heg84] Hegler, R. P.: Faserorientierung beim Verarbeiten kurzfaserverstärkter Thermoplaste. In: Kunststoffe 74/1984. S. 271 – 277.
- [Heg87] Hegler, R. P.: Struktur und mechanische Eigenschaften glaspartikelgefüllter Thermoplaste. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1987.
- [Hie19] N.N.: Internetauftritt Fa. Hiendl. <https://www.hiendl-kunststofftechnik.de/> Zugriff 06/2019.
- [Hie10] Wolfram, I.: Firmenpräsentation Hiendl. 2010. online unter <https://slideplayer.org/slide/212760/>.
- [Hua06] Huan, S.-H.; et al.: The influence of moisture on the mechanical properties of wood polymer composites. In: J. Materials Sci. 41/2006. S. 5386 – 5390.
- [Huc18] Huc, S.; et al.: Rheological behavior of wood in stress relaxation under compression. In: Wood Sci. Technology, 52/2018. S. 793 – 808.
- [Hue09] Hübner, U.: Auszieh Widerstand von Holzschrauben in Eschen-Brettschicht-holz. 15. Internationales Holzbau-Forum. 2009.
- [Ite19] N. N.: Firmenschrift der Firma item: Item Produktkatalog. Online unter <https://product.item24.de/produkte/produktkatalog/produktdetails/products>

- /profile-und-zubehoer-1001043003/profil-kh-8-40x40-anthrazit-64161/ Zugriff 06/2019.
- [Kho08] Khoo, T. S.; et al.: Wood Filler-recycled Polypropylene (WF-RPP) Composite Pallet: Study of Fastening Method. In: Journal of reinforced plastics and composites, 27/2008. S. 1723 – 1731.
- [Klu12] Klusmeier, W.: Einsatz von Naturfasern im Innenraum eines Autos – Status und Entwicklung. Johnson Controls, Wolfsburg, 2012.
- [Klu17] Kluge, P.; et al.: Vertikalförderer in Holzbauweise. Tagungsband Technomer, Chemnitz. 2017.
- [Koc07] Kociszewski, M.; et al.: Screw withdrawal strength of WPC made by injection moulding method. In: Forestry and Wood Technology, 61/2007. S. 336 – 339.
- [Kol61] Kollmann, F.: Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz. Holz als Roh- und Werkstoff. 19/1961. S. 73 – 80.
- [Kor14] Korte, H.; Koch, G.: Mikroskopische und spektroskopische Untersuchungen von Holz-Polymer-Verbundwerkstoffen (WPC). In: Holztechnologie, 55/2014. S. 35 – 43.
- [Kos14] N.N.: Kovalex Verlegeanleitung. Firma Kosche. 10/2014.
- [Kra18] Kraemer, F.; et al.: Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde. Schlussbericht, Forschungsvereinigung Automobiltechnik, FAT-Schriftenreihe 309. 2018.
- [Kre08] Kreiter, J.: WPC: Innovativer Allround Werkstoff. Vortrag 15. C.A.R.M.E.N-Forum, Straubing, 2008.
- [Kri72] Krieger, D.: Spannungsrelaxation bei mechanischen Beanspruchungen verschiedener Art und Größe. In: Kolloid.Z. u. Z. Polymere, 250/ 1972. S. 1131 – 1134.
- [Kro02] Krobjilowski, A.; et al.: Naturfaserverstärkte Polymer-Werkstoffklasse und Anwendungsfelder. Kurier der AVK-TV e.V.; 2002. S. 10 – 11.
- [Kut91] Kutty, S.K.; et al.: Short Kevlar fiber-thermoplastic polyurethane composite. In: J. Appl. Polym. Sci. 43/1991, S. 1913 – 1923.
- [Lue11] Lüdtkke, J.: Entwicklung und Evaluierung eines Konzeptes für die kontinuierliche Herstellung von Leichtbauplatten mit polymerbasiertem Kern und Holzwerkstoffdecklagen. Dissertation, Universität Hamburg, 2011.
- [Mad09] Madhoushi, M.; et al.: Withdrawal strength of fasteners in rice straw fibre-thermoplastic composites under dry and wet conditions. In: Polymer Testing, 28/2009. S. 301 – 306.

- [Men82] Menges, G.; et al.: Die Faserorientierung und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften thermoplastischer Spritzgießteile – Eine Abschätzmethode. In: Colloid Polym. Sci., 1982, S. 73 – 81.
- [Mil07] Miljkovic, J.; et al.: Edge screw withdrawal resistance in conventional particleboard and OSB – Influence of the particle type. Biblid: 2007. S. 109 – 117.
- [Mit04] Mittermeier, J.: Neue Dimensionen für Naturfasern- Nachwachsende Rohstoffe im KFZ-Interieur. Firma Dräxlmaier Group. Forum tech transfer. 2004.
- [Moe13] N.N.: Technisches Datenblatt Lignodur terrafina Bodendiele massiv. Firma Möller. 2013.
- [Moe70] Möhler, K.; Maier, G.: Kriech- und Relaxationsverhalten von lufttrockenem und nassem Fichtenholz bei Querdruckbeanspruchung. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 1970.
- [Moh12] Mohamedzadeh, M.; et.al.: Numerical and experimental failure analysis of screwed single shear joints in wood plastic composite. In: Materials and Design. 35/2012. S. 404 – 413.
- [Mon12] Moneta, C.: Advantages of direkt extrusion technology for WPC products. Tagungsband zum 9th WPC, Natural Fibre and other innovative composites Congress and Exhibition, Stuttgart/ Fellbach, 2012.
- [Muh05] Muhs, D.; et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente, Normung, Berechnung, Gestaltung – Lehrbuch und Tabellenbuch. Band 1, 17. Auflage. Vieweg und Teubner Verlag, 2005.
- [Mue99] Müller, B.: Prozessuntersuchungen zum Direktverschrauben in thermoplastische Kunststoffwerkstoffe. Technischer Bericht, Universität Erlangen - Nürnberg, 1999.
- [Mue15] Müller, C.: Untersuchung von Holzwerkstoffen unter Schlagbelastung zur Beurteilung der Werkstoffeignung für den Maschinenbau. Dissertation. TU Chemnitz, 2015.
- [Neu09] Neuhaus, H.: Ingenieurholzbau Grundlagen – Bemessung – Nachweise – Beispiele. 2. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [Nie93] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag. Leinfelden-Echterdingen. 1993.
- [NN17] N.N.: Qualitäts- und Prüfbestimmungen zur Qualitätskontrolle von Terrassendecks aus Holz-Polymer-Werkstoffen. Gütesiegel der Qualitätsgemeinschaft Holzwerkstoffe e.V., 2017.
- [NN04] N. N.: Firmenschrift Novo-Tech: Barfußdiele Megawood®. 2004.

- [Nov13] Novo-Tech GmbH & Co. KG, 2013. Trag- und Gleitelement. Anmeldung: 1.6.2012. DE102012209287A1. 5.12.2013.
- [Nov15] N. N.: Firmenschrift Novo-Tech: megawood® Bauanleitung. 2015.
- [Nov16] N. N.: Firmenschrift Novo-Tech: Technisches Heft megawood®. 2016.
- [Oba17] Obaid, N.; et al.: Understanding the Stress relaxation behavior of polymers reinforced with short elastic fibers. In: Materials. 10/2017.
- [Ona83] Onasch, J.: Zum Verschrauben von Bauteilen aus Polymerwerkstoffen mit gewindeformenden Metallschrauben. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1983.
- [Ort05] Ortmann, S.; et al.: Die kommende Werkstoffgruppe – Naturfaser-Polypropylen- Spritzgießen. In: Kunststoffe, 2005. S. 23 – 28.
- [Pir09] Pirnbacher, G.: Beanspruchungs- und Optimierungspotentiale selbstbohrender Holzschrauben. 15. Internationales Holzbau-Forum. 2009.
- [Pot04] Pothan, L.A.; et al.: Stress relaxation behavior of banana fibre-reinforced polyester composites. In: J. Reinforced Plastic Comp. 23/2004, S. 153-165.
- [Rad07] Radovanovic, I.: Verarbeitung und Optimierung der Rezeptur von Wood Plastic Composite. Dissertation, Osnabrück, 2007.
- [Rad08] Radovanovic, I.; Kretschmer, K.: Was ist heute möglich mit holzgefüllten Thermoplasten? In: Aufbereitungstechnik von Naturfasern bis Nanoadditiven, VDI, 2008.
- [Ram16] N. N.: Internetpräsentation der Firma Rampa, Hans Brüggemann GmbH Co. KG. Zugriff 2016.
- [Reh14] N. N.: Firmenschrift Rehau: Verlegeanleitung relazzo Decking. 2014.
- [Rin12] Ringhofer, A.; Brandner, R.: Einfluss der Anzahl und Orientierungen der Schichten auf das Ausziehtragverhalten selbstbohrender Holzschrauben in Brettsperrholz. 18. Internationales Holzbau-Forum, 2012.
- [Sae14] Saeed, U.; et al.: HDPE reinforced with glass fibers: Rheology, tensile properties, stress relaxation and orientation of fibers. In: Polym. Compos. 35/2014. S. 2159 - 2169.
- [Sch03] Schachtschneider, H.; et al.: Gezielte Einstellung der akustischen Eigenschaften von FVW aus Naturfasern durch Variation des Aufbaus und der Oberfläche. 6. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe, Baden-Baden, 2003.
- [Sch05] Schwarz, W.: Untersuchungen über die statische Tragfähigkeit von Einschraubverbindungen. Universität Siegen. Online unter:

- <https://docplayer.org/16001191-Untersuchungen-ueber-die-statische-tragfaehigkeit-von-einschraubverbindungen.html>, 2005.
- [Sch07] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007.
- [Sch08] Scheel, G.: Neue Wege bei der Naturfaser-Compoundierung mit gleichläufigen Zweischnckenextrudern. In: Aufbereitungstechnik von Naturfasern bis Nanoadditiven. VDI. Düsseldorf, 2008.
- [Sch10] Schirp, A.: Veränderung der Farbe und mechanisch-physikalischer Eigenschaften von Wood Polymer Composite auf Polyolefinbasis nach UV-Schnellbewitterung und Wasserlagerung. In: Holztechnologie 51/2010.
- [Sch13] Schröder, C.: Verfahrenstechnische Entwicklung zum Hinterspritzen von Echtholz furnieren mit Wood-Plastic-Composite (WPC). Dissertation, Universität Paderborn, 2013.
- [Sch15] N. N.: Firmenschrift Schriever: STS Plus die optimierte Verbindung für Thermoplaste. Zugriff 2015.
- [Sch16] Schubert, C.: WPC-Werkstoffauswahl für Schraubverbindungen in maschinenbautechnischen Anwendungen. In: Holztechnologie, 57/2016. S. 23 – 30.
- [Sch17] Schleinitz, A.; et al.: Hängefördersystem mit Trag- und Gleitelement aus WPC. Tagungsband Technomer, Chemnitz, 2017.
- [Sch17a] Schubert, C.: Konstruktive Einflussparameter auf Direktverschraubungen in hochgefüllten, extrudierten Holz-Polymer-Werkstoffen. In: Tagungsband, Technomer Chemnitz, 2017.
- [Sch18a] Schubert, C.; et al.: Lösbare Verbindungstechnik für Bauteile aus Wood Polymer Composite (WPC) unter dynamischen Belastungen. Schlussbericht FNR 22001814, 2018.
- [Sch18b] Schubert, C.: Konstruktive Einflussparameter auf Quergewindebolzen-Steckschraubverbindungen in hochgefüllten Holz-Polymer-Extrusionsprofilen. In: Tagungsband 18. Holztechnologisches Kolloquium Dresden, Band 23, April 2018, S. 227 - 235.
- [Sch95] Schlösser, T.; et al.: Fahrzeugbau und Ökologie – Naturfaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeuginnenbereich. In: Kunststoffe, 85/1995. S. 319 – 321.
- [Sch97] Schlößer, T.; et al.: Naturfaserverstärkte Fahrzeugteile. In: Kunststoffe, 9/1997. S. 1148 – 1152.

- [Sem06] Semple, K.; et al.: Prediction of internal bond strength in particleboard from screw withdrawal resistance models. In: Wood and Fiber Science. 38/2006. S. 256 – 267.
- [Sim14] Simenova, R.: Study on bending strength of end corner detachable joints of structural elements made of plywood. In: Innovation in woodworking industry and engineering design. 6/2014. S. 93 – 101.
- [Sim95] Simenova, N.: Zum Einfluss der Verarbeitungsparameter auf die Faserorientierung in extrudierten Rohren. Dissertation, TU Chemnitz – Zwickau, 1995.
- [Spe07] Specht, K.: Holz- und hanffaserverstärktes Polypropylen in der Spritzgussverarbeitung. Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [Ste10] Steilner, M.; et al.: Selbstbohrende Holzschrauben mit veränderlicher Gewindesteigung. Karlsruher Institut für Technologie. 2010.
- [Ste11] Steilner, M.: Verspannen von Holz mit Vollgewindeschrauben. 17. Internationales Holzbau-Forum. 2011.
- [Ste14] Steilner, M.: Querdruckvorspannung von Holz mit Vollgewindeschrauben Relaxation und Anwendung. Karlsruher Institut für Technologie. 2014.
- [Suh98] Suhara, F.; et al.: Stress relaxation of polyester fiber-polyurethane elastomer composite with different interfacial bonding agents. In: J. Elastom. Plastics, 30/1998, S. 103 – 117.
- [Swi19] N. N.: Firma Swiss Krono: Technische Daten MDF-Platte. Online unter <https://m.swisskrono.de/Oekologische-Holzwerkstoffe/Produkte/SWISS-KRONO-MDF-HDF/SWISS-KRONO-MDF-Moulding/Technische-Daten-0206235556.html>. Zugriff 06/2019.
- [Taj03] Tajvidi, M.; et al.: Water uptake and mechanical characteristics of natural filler polypropylene composites. In: Journal of applied Polymer Science. 88/2003. S. 941 – 946.
- [Tom00] Tome, A.: Vorspannkraftrelaxation von Kunststoff-Direktverschraubungen. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg. 2000.
- [Tri91] Trinter, F.: Zur Festigkeit von Schraubverbindungen an Bauteilen aus SMC. Dissertation. Universität – Gesamthochschule Kassel. 1991.
- [Tro84] Tröger, F.; et al.: Schraubenhaltevermögen von mittelharten Faserplatten (MDF) und Spanplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff. 1984. S. 153.
- [Uib09] Uibel, T.: Beurteilung der Spaltgefahr beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. 15. Internationales Holzbau-Forum 2009.

- [Uib12] Uibel, T.: Spaltverhalten von Holz beim Eindrehen von selbstbohrenden Holzschrauben. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2012.
- [Val11] Valente, M.; et al.: Hybrid recycled glass fiber/wood flour thermoplastic composites: Manufacturing and mechanical characterization. In: Composites: Part A, 42/2011. S. 649 – 647.
- [Vas04] Vassiliou, V.; et al.: Holding strength of insert fittings of the eccentric joints in particleboard and MDF. Nabytok Technical University Zvolen. 2004.
- [VDI2014] VDI 2014 Blatt 3: Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund Berechnung. VDI Gesellschaft Materials Engineering. Beuth Verlag, 2006.
- [VDI2230] VDI 2230 Blatt 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubenverbindung. VDI – Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung. Beuth Verlag, 2015.
- [VDI2251] VDI 2251 Blatt 1.1: Schraubverbindungen – Spannverbindungen – Feinwerkelemente. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, 2016.
- [Wag93] Wagner, C.; et al.: Ermittlung des Tragverhaltens von Schrauben des Möbelbaues in Holz und Holzwerkstoffen. Forschungsbericht FH Rosenheim. 1993.
- [Wan07] Wang, X.; et al.: Localized density effects on fastener holding capacities in wood based panels. In: Forest Products Journal. Vol. 57. 2007.
- [Wan11] Wang, Y.; et al.: Stress relaxation of wood flour/Polypropylene composites at room temperature. In: Wood and Fiber Science, 43/2011. S. 262-270.
- [Wer14] N. N.: Firmenschrift Werzalit: Montagevorschrift entero / entero plus. 2014.
- [Wer15] N. N.: Firmenschrift Werzalit: Technische Daten entero/ entero plus Terrassenvollprofil. 2015.
- [Wie07] Wiegand, H.; et al.: Schraubenverbindungen, Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung. 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [Wit94] Wittig, W.: Einsatz von Naturfasern in Kfz-Bauteilen. In: Kunststoffe im Automobilbau. 1994. S. 259 – 279.
- [Wue16] N. N.: Firmenschrift Würth: Direktverschraubung in Kunststoff und Metalle. Online. Zugriff 2016.
- [Yao11] Yao, Y.: Polymerwerkstoff-Direktverschraubung: Einsatz von Experiment und Simulation zur Analyse des Vorspannkraftverlustes. Dissertation. TU Kaiserslautern. 2011.

10 Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Potentielle WPC-Profile für die Fördertechnik, Konstruktionsprofil, Glattkantbrett als Gleitleiste, Montageprofile Fa. Item, Rundprofil Fa. Item, Trag- und Gleitprofil (v.l.n.r.)	16
Bild 2.2: Faserorientierung in spritzgegossenen Halbzeugen nach [Heg84] 1: faserarme Randschicht, 2: regellose Faserorientierung, 3: Fasern vorwiegend parallel zur Fließrichtung, 4: regellose Faserorientierung, 5: Fasern vorwiegend senkrecht zur Fließrichtung	18
Bild 2.3: Schematische Faserorientierung nach Beschreibungen aus [Sim95, Heg84]...	19
Bild 2.4: Vier-Parameter-Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen [Ehr11] (0 = elastisch; v = viskos, rel = relaxierend, entl = Entlastung, t = t _s)	22
Bild 2.5: Anwendungsbeispiele hochgefüllter WPC-Profile a) Gleitleiste im Vertikalförderer [Klu17], b) Abwurftisch Hiendl NFC Profile [Hie10], c) Schallschutzgerüst [Hie19], d) EMV-Messtand [Hie19], e) Regalsystem [Ite19], f) Hängefördersystem mit Trag- und Gleitelement [Eic13].....	25
Bild 2.6: Preis-Leistungs-Vergleich der Profile aus WPC (Fa. Item), Aluminium (Fa. Item) und WVC, Grunddaten für den Profilvergleich siehe Anhang Tabelle A 1.....	26
Bild 2.7: Einteilung der Einschraubverbindungen nach Zusatzelement und Branche, HB = Holzbau, MB = Möbelbau, KT = Kunststofftechnik [DIN1995, Ram16, Ehr04].....	29
Bild 2.8: Schraubenlinie nach [Muh05].....	31
Bild 2.9: Verspannungsschaubild im Montagezustand	32
Bild 2.10: Verspannungsschaubild im Betriebszustand mit einer Zug-Betriebskraft.....	32
Bild 2.11: Einschraubtiefe und Kennzeichnung der kritischen Einschraubtiefe nach [VDI 2230, S. 98].....	34
Bild 2.12: Hauptbeanspruchungsrichtungen von Holzschraubverbindungen, Herausziehen (links) und Abscheren (rechts) nach [Neu09, S. 189 f].....	35
Bild 2.13: Holzschraubgewinde nach DIN 7998 mit d ₁ = 4 mm, d ₃ = 2,8 mm, P = 1,35 mm	36
Bild 2.14: Drehmoment- und Vorspannkraftverlauf beim Montageprozess von Direktverschraubungen nach [Ehr04, Ejo15], n = konstant.....	43
Bild 2.15: Belastungen in der Einschraubstelle, Grafik erweitert [Gro93].....	44

Bild 2.16: Auslegung der spritzgegossenen Einschraubstelle für Kunststoff-Direktverschraubungen nach DVS 2241-1.....	45
Bild 2.17: Parameterwechselwirkung bei Direktverschraubungen auf Basis [Ona83, Dra99, Tom00].....	46
Bild 2.18: Schematische Darstellung der Montagekenngrößen und Verbindungseigenschaften in Kunststoff-Direktverschraubungen [DVS 2241-1].....	47
Bild 2.19: QGB-Steckschraubverbindung [Ram16].....	52
Bild 5.1: Orientierung der holzbasierenden Füllstoffe im Probenmaterial aus dem Halbzeug Terrassendiele in der Draufsichtaufnahme (oben) und in der Querschnittaufnahme (unten), Entnahmestelle jeweils 40 mm von der Außenkante entfernt, Skalierungsbalken entspricht jeweils 2 mm.....	68
Bild 5.2: Richtungsfestlegung [Sch17a, Sch18a].....	70
Bild 5.3: Probekörpergeometrie QGB-Steckschraubverbindung (ESV-QGB).....	71
Bild 5.4: Probekörpergeometrie Direktverschraubung (ESV-GFS) [Sch17a, Sch18a].....	71
Bild 5.5: Gewindegeometrie untersuchter gewindeformender Schrauben für Holzwerkstoffe, Thermoplaste, Leichtmetalle, Duroplaste (v.l.n.r.).....	72
Bild 5.6: Verbindungsaufbau beider Schraubverbindungen.....	74
Bild 5.7: Verschraubungsprüfstand, EC-Schraubspindel Fa. Bosch Rexroth.....	75
Bild 5.8: Probekörperaufnahme für Montageversuche (Überdrehversuch mit Kopfreibung) [Sch18a].....	76
Bild 5.9: Schematische Darstellung der Drehmoment-Drehwinkelkurve im Weiterdrehversuch und Ermittlung der Steifigkeit.....	78
Bild 5.10: Schematischer Prüfaufbau für den statischen Auszugsversuch mit Montageplatte (a) und ohne Gegenplatte (b) [Sch18b].....	79
Bild 5.11: Probeneinspannung für den statischen Auszugsversuch mit Vorspannkraft [Sch18a].....	82
Bild 5.12: Schematische Darstellung des Nachziehens und der Relaxationsintervalle....	84
Bild 5.13: Versuchsaufbau der getesteten Schraubverbindungen, Probekörper 60 x 60 x 15 mm, Schraubenlänge 55 mm.....	84
Bild 5.14: Ausmessen der Verankerungslänge V_{FL} mittels Auflichtmikroskopie in der Direktverschraubung, Schraube für Thermoplaste STSplus (Vergrößerung 50x).....	87
Bild 6.1: Statische Auszugskraft (a) und statischer Ausziehparameter (b) der Schraube für Holzwerkstoffe HS, Thermoplaste TS, Leichtmetalle MS und Duroplaste DS aus dem	

Material WPC-5, ermittelt im statische Auszugsversuch mit $v = 10 \text{ mm/min}$, Materialfeuchtigkeit = 1,12%. **88**

Bild 6.2: Montageparameter d_M , M_E , $M_{\dot{U}}$, F_{vmax} im Überdrehversuch mit minimierter Kopfreibung der Direktverschraubung mit den Schraubentypen Holzschraube (a, b) Schraube für Thermoplaste (c, d) und Schraube für Leichtmetalle (e, f) in WPC-5, Richtung P-SE. Materialfeuchtigkeit = 1,4%, $N = 5$. [Sch18a]..... **90**

Bild 6.3: Montageparameter d_M , M_E , $M_{\dot{U}}$, F_{vmax} im Überdrehversuch mit minimierter Kopfreibung der Direktverschraubung mit für den Schraubentyp Schriever STS plus $d_1 = 6 \text{ mm}$ in den Werkstoffen WPC-1 (a, b), WPC-5 (c, d) und WPC-6 (e, f). Materialfeuchtigkeit = 1,2 - 2%, $N = 5$, [Sch18a]. Gefüllte Datenpunkte = Werte für Matrixmaterial (PVC, PE-HD, PP)..... **92**

Bild 6.4: Montageparameter im Überdrehversuch bei minimierter Kopfreibung mit variabler Einschraublänge, in den Werkstoffen WPC-5 (a, b, c, d) und WPC-6 (e, f). Leere Punkte = Schraubenbruch M_{SB} , Materialfeuchtigkeit = 1,5%, $N = 5$ **94**

Bild 6.5: Gewindeeingriff nach dem Versagen im Überdrehversuch für die Einschraubrichtung senkrecht zur Extrusionsrichtung S-SE (links) und parallel zur Extrusionsrichtung S-PE (rechts), Werkstoff WPC-6, Schraube STS plus $d_1 = 6 \text{ mm}$, $d_K = 5 \text{ mm}$ **95**

Bild 6.6: Montageparameter und Rissverlauf im Überdrehversuch mit Kopfreibung mit variabler Bauteildicke bei konstanter Bauteilbreite für die Einschraubrichtung parallel zur Extrusion (a, b) und Platte, senkrecht zur Extrusion (c, d) in WPC-5, Konstruktionsbohle [Sch18a]..... **97**

Bild 6.7: Montageparameter und Rissverlauf im Überdrehversuch mit Kopfreibung mit variabler Bauteildicke und Bauteilbreite für die Einschraubrichtung parallel zur Extrusion (a - d) und Platte, senkrecht zur Extrusion (e, f) in WPC-5, Konstruktionsbohle..... **99**

Bild 6.8: Konstruktiv relevante Einschraubrichtungen der QGB-Steckschraubverbindung in plattenförmigen Halbzeugen aus WPC..... **100**

Bild 6.9: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte und Schadensmechanismus in Abhängigkeit des e/D_1 -Verhältnisses, Werkstoff WPC-5, Einschraubrichtung S-PE, Materialfeuchtigkeit = 1,3%, (Ausschnitt aus [Sch18a])..... **101**

Bild 6.10: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte und Schadensmechanismus in Abhängigkeit des w/D_1 -Verhältnisses, Werkstoff WPC-5, Einschraubrichtung S-PE, Schadensmechanismus für $D_1 = 10 \text{ mm}$, Materialfeuchtigkeit = 1,3%, [Sch18a, Sch18b]..... **102**

Bild 6.11: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Gegenplatte und Schadensmechanismus in Abhängigkeit der Bauteildicke t , Werkstoff WPC-5 Konstruktionsbohle, Einschraubrichtung S-PE, Materialfeuchtigkeit = 1,3% [Sch18a, Sch18b].... **103**

Bild 6.12: Lokale Druckfestigkeit in S-PE Richtung, Konstruktionsbohle WPC-5.....	104
Bild 6.13: Mechanische Kennwerte im statischen Auszugsversuch mit Montageplatte und Schadensmechanismus im Überdrehversuch mit Kopfreibung der Werkstoffe WPC-5, WPC-1, WPC-6, in Abhängigkeit der Einschraubrichtung, Materialfeuchtigkeit = 0,78 % - 1,14% [Sch18a, Sch18b].....	105
Bild 6.14: Montageparameter im Überdrehversuch bei min. Kopfreibung der Direktverschraubung in Abhängigkeit der Montagedrehzahl, $N = 3$, (leere Symbole = einstufige Schraubmontage, volle Symbole = zweistufige Schraubmontage mit $n_E = 600$ U/min und $n_A = 100$ U/min) [Sch18a].	107
Bild 6.15: Relativer Vorspannkraftverlauf direkt nach Abschalten der Schraubspindel bei Montagedrehzahlen zwischen 5 - 100 U/min der Direktverschraubung (links) und QGB-Steckschraubverbindung (rechts), drehmomentengeregeltes Anziehverfahren.....	108
Bild 6.16: Absolute Vorspannkraftrelaxation in den Nachziehintervallen und Zeitpunkt des Nachziehens der Schraubverbindungen	110
Bild 6.17: Schwellwert der Relaxationsgeschwindigkeit im jeweils letzten Nachziehintervall, $N = 5$, volle Symbole = Mittelwerte.....	111
Bild 6.18: Lichtmikroskopie des Gewindeeingriffes der Schraube für Thermoplaste (Schriever STS plus) in WPC-5. $d_1 = 6$ mm, $d_k = 5$ mm, $l_E = 34,2$ mm, $F_v = 2$ kN ohne Nachzug (Vergrößerung 100x).....	112
Bild 6.19: Auflichtmikroskopie der Direktverschraubung in WPC-5 mit $F_v = 2$ kN (oben) und $F_v = 8$ kN (unten) ohne Schraubennachzug (links) und mit Schraubennachzug (rechts), Schraube STSplus $d_1 = 6$ mm, $d_k = 5$ mm, $l_E = 34,2$ mm, Vergrößerung 50x, Mittelwert L_{VF} aus je 28 Einzelmessungen.	113
Bild 6.20: Feuchtegehalt der Testwerkstoffe während der Kaltwasserlagerung über 9 Monate.....	115
Bild 6.21: Sorptionsbereich des Materials WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung senkrecht und parallel zur Extrusionsrichtung, Probengröße 60 x 60 x 15 mm, Quadrate kennzeichnen Probeentnahme für Feuchtebestimmung nach Karl Fischer.....	115
Bild 6.22: Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter der Direktverschraubung, abgebildet durch die Konditionierung bei 103 °C (darrtrocken), bei Raumklima (20°C, 30% rel. LF) und unter Kaltwasserlagerung, Konditionierungsdauer = 90 Tage. Materialfeuchtigkeit darrtrocken = 0%, Raumklima = 1,2%, Kaltwasserlagerung = 7,25% [Sch18a].....	117
Bild 6.23: Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter der Direktverschraubung in den drei Einschraubrichtungen. Bohrung der Proben vor Lagerung. Konditionierungsdauer = 90 Tage. Materialfeuchtigkeit der Proben im Raumklima (20 °C, 30% rel. LF) = 1,2% und nach der Kaltwasserlagerung = 7,25%.....	118

- Bild 6.24:** Sorptionsbereich der im Überdrehversuch versagten Proben des Materials WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung (Einschraubrichtung P-SE Richtung, Sichtebeene entspricht S-SE Richtung bzw. Längsrichtung) **119**
- Bild 6.25:** Einfluss der Materialfeuchtigkeit auf die Montageparameter der QGB-Steckschraubverbindung, abgebildet durch die Konditionierung bei 103 °C (darrtrocken), bei Raumklima (20°C, 30% rel. LF) und unter Kaltwasserlagerung, Konditionierungsdauer = 90 Tage. Materialfeuchtigkeit darrtrocken = 0%, Raumklima = 1,2%, Kaltwasserlagerung = 7,25%, [Sch18a]..... **120**
- Bild 6.26:** Sorptionsbereich der im Überdrehversuch versagten QGB-Steckschraubverbindung des Materials WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung (Einschraubrichtung S-PE-Richtung, Sichtebeene entspricht S-SE Richtung bzw. Längsrichtung) **121**
- Bild 6.27:** Statische Auszugskraft (links) und Verbindungssteifigkeit (rechts) vorgespannter Einschraubverbindungen [Sch18a]..... **122**
- Bild 6.28:** Relativer Vorspannkraftverlauf beider Schraubverbindungen mit $F_v = 4 \text{ kN}$ (links) und Verbindungssteifigkeit aus Drehmoment-Drehwinkel-Kurve ermittelt (rechts); theoretische Verankerungsfläche $A_{\text{ver}} = 146,7 \text{ mm}^2$, konstruktive Kenngrößen und Verbindungsmittel gemäß Tabelle 5.4. **123**
- Bild 6.29:** Reale Kontaktfläche der QGB an der Bohrungswandung in Abhängigkeit von der Vorspannkraft..... **124**
- Bild 6.30:** Relativer Vorspannkraftverlauf für Direktverschraubungen (links) und QGB-Steckschraubverbindungen (rechts) an unterschiedlich vorkonditionierten Probenmaterial (rote Kurve = darrtrocken, schwarze Kurve = 20 °C, 65% rel. LF), Einzelmessungen.... **124**
- Bild 6.31:** Geometrie der im Kaltwasser ausgelagerten Proben, $t = 28 \text{ d}$, unverspannt und mit Anbauteil verspannt auf ca. $F_v = 6 \text{ kN}$, $N = 5$ **126**
- Bild 6.32:** Probendicke und QGB-Kontaktfläche an der Bohrungswandung von verspannten QGB-Steckschraubverbindungen nach Konditionierung im Raumklima (Mitte) und im Kaltwasser (rechts)..... **127**
- Bild 6.33:** Sorptionsbereich nach 28-tägiger Kaltwasserlagerung der mit ca. 6 kN verspannten QGB-Steckschraubverbindung (oben) und Direktverschraubung (unten), Einschraubrichtung S-PE-Richtung..... **127**
- Bild 6.34:** Verbindungssteifigkeit ermittelt im Weiterdrehversuch der im Kaltwasser und im Raumklima konditionierten Schraubverbindungen..... **128**
- Bild 6.35:** Relativer Vorspannkraftverlauf über 28 Tage von nachgezogenen und nicht nachgezogenen Direktverschraubungen mit der Montagevorspannkraft von $F_v = 2 \text{ kN}$ (links) und $F_v = 6 \text{ kN}$ (rechts), Raumklima 20 °C - 23 °C, 29% - 34% rel. LF..... **129**

Bild 6.36: Relaxationsgeschwindigkeit (links) und relative Restvorspannkraft (rechts) nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Anfangsmontagevorspannkraft, Einzelwerte aus kontinuierlichen Vorspannkraftmessung abgelesen, $N = 3$	130
Bild 6.37: Restvorspannkraft nach 28 Tagen in Abhängigkeit von der Anfangsmontagevorspannkraft, $N = 3$	131
Bild 7.1: Konstruktive Gestaltung der Direktverschraubung in WPC-5 mit der Schraube für Thermoplaste (Schriefer STS plus $d_1 = 6$ mm).....	132
Bild 7.2: Konstruktive Gestaltung der QGB-Steckschraubverbindung M6 in WPC-5, mit $w/D_1 = 3$ (oben) und $w/D_1 = 5$ (unten), $D = 12$ mm, Schraube M6.....	134
Bild 7.3: Versagensbild der QGB-Steckschraubverbindung M6 mit dem Bolzendurchmesser $D_1 = 12$ mm für die Werkstoffe:.....	135
Bild 7.4: Darstellung der nach Formel 7 berechneten Anzugmomente auf Basis des Überdrehversuches mit Kopfreibung von Direktverschraubungen in WPC-5 für die Verwendung eines Drehmomentenschlüssels (links) und eines Drehschraubers (rechts)....	136
Bild 7.5: Extrapolierter Vorspannkraftverlauf für die Nutzungsdauer von 10 Jahren von nachgezogenen und nicht nachgezogenen Direktverschraubungen zur Abschätzung der Wartungsintervalle definierte Mindestvorspannkraft $F_{v_soll} = 5$ kN. Extrapolation der Einzelmessungen aus Kapitel 6.3.2.....	139
Bild 7.6: Schematische Querschnittsdarstellung des Sorptionsbereiches und der Lage des Verbindungsmittels für QGB-Steckschraubverbindung (links) und Direktverschraubung (rechts).....	142
Bild 7.7: Eckverbindung eines Vierkantprofils.....	144
Bild 7.8: Eckverbindung als Direktverschraubung und als QGB-Steckschraubverbindung von WPC-Rundprofilen.....	145
Bild 7.9: Aufhängung des WPC- Trag- und Gleitprofils an das Gestell im Hängefördersystem aus [Sch17].....	146

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung der Formgebungsverfahren für WPC [Sch13, Kre08, Klu12, Cha08, Fal01, Mad09].....	15
Tabelle 2.2: Wasseraufnahme und Quellung von WPC und Holzwerkstoffen im Vergleich (WPC-Profil mit 70 Gew-% Holz nach 28-tägiger Kaltwasserlagerung), Angaben in % ..	21
Tabelle 2.3: Verbindungstechnik ausgewählter technischer Profile.....	28
Tabelle 2.4: Versagensfälle der Direktverschraubung in Extrusionsprofilen [Ehr04].....	45
Tabelle 2.5: Versagensmechanismen von Bolzenverbindungen nach [Sch07].....	54
Tabelle 2.6: Vergleich der Einschraubverbindungen aus dem Stand der Technik.....	56
Tabelle 4.1: Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit der Einschraubverbindungen.....	64
Tabelle 4.2: Versuchsplan für den Versuchsteil 1.....	65
Tabelle 5.1: Physikalische und mechanische Eigenschaften der untersuchten Holz-Polymer-Werkstoffe (Werte wurden in eigenen Versuchen gemessen, * aus Datenblättern [Wer15, Nov16, Moe13]).....	69
Tabelle 5.2: Eingesetzte gewindeformende Schrauben.....	73
Tabelle 5.3: Berechnungswerte für die effektiv wirksame Gewindefläche A_{ef} für $l_E = 15$ mm	81
Tabelle 5.4: Verbindungsmittel und konstruktive Parameter im statischen Auszugsversuch mit Vorspannkraft.....	82
Tabelle 5.5: Abgebildete Szenarien für die Vorspannkraftrelaxation in Produktionsstätten	85
Tabelle 6.1: Maximale Auszugskräfte bei entsprechendem e/D_1 -Verhältnis sowie die Montagekennwerte im Überdrehversuch mit Kopfreibung in Abhängigkeit des Werkstoffes und der Einschraubrichtung	106
Tabelle 6.2: Anzahl des Nachziehens und Mittelwerte der Relaxationsgeschwindigkeit im jeweils letzten Nachziehintervall.....	111
Tabelle 6.3: Richtungsabhängige Quellung, Sorptionstiefe und Sorptionsrate WPC-5 nach 90-tägiger Kaltwasserlagerung, $N = 9$, Feuchtegehalt = 7,25%.....	116
Tabelle 6.4: Feuchtegehalt der Testproben, $N = 8$	125
Tabelle 7.1: Mittlere Anzugmomente und resultierende Vorspannkkräfte, ermittelt im drehmomentengeregelten Anzugversuch $N = 5$	137

Tabelle 7.2: Prozentuale Abweichung der maximal übertragbaren Vorspannkraft beim Überdrehen in Abhängigkeit der Einschraubrichtung für Direktverschraubungen**141**

Tabelle 7.3: Prozentuale Abweichung der Auszugskraft in Abhängigkeit der Einschraubrichtung für QGB-Steckschraubverbindungen.....**141**

12 Anhang

Tabelle A 1: Grunddaten für Profilvergleich aus Bild 2.1

Profilwerkstoff	Aluminium	WPC	WVC
Außenmaße [mm]	40 x 40	40 x 40	50 X 50
Flächenträgheitsmoment [mm ⁴]	73800	144435	367524
Biegefestigkeit [MPa]	373	72	62
Biegemodul [MPa]	65850	8705	7750
Dichte [g/cm ³]	2,71	1,2	0,66
Gewicht [kg/lfm]	1,37	1,06	0,7
Preis [€/lfm]*	21,95	12,15	15,50**

*ohne Mwst., incl. Zuschnittkosten

**unlackiert, mit B1-Lackierung 18,80€ (2016)

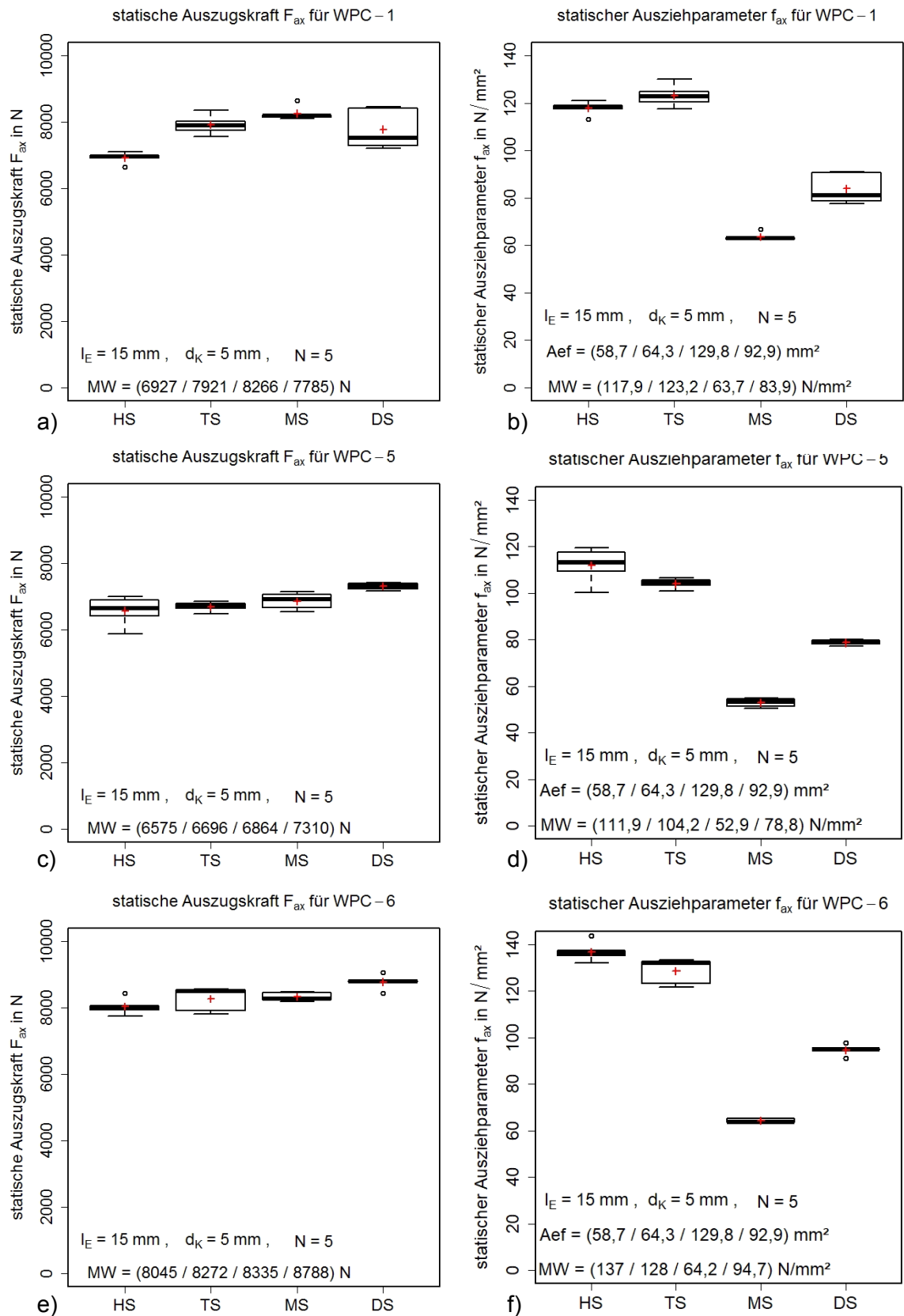


Bild A 1: Statische Auszugskraft (a,c,e) und statischer Ausziehparameter (b,d,f) der Schraube für Holzwerkstoffe HS, für Thermoplaste TS, für Leichtmetalle MS und für Duroplaste DS aus den Materialien WPC-1, WPC-5, WPC-6, ermittelt im statischen Auszugversuch mit $v = 10 \text{ mm/min}$, Materialfeuchtigkeit = 1,12 - 2%.

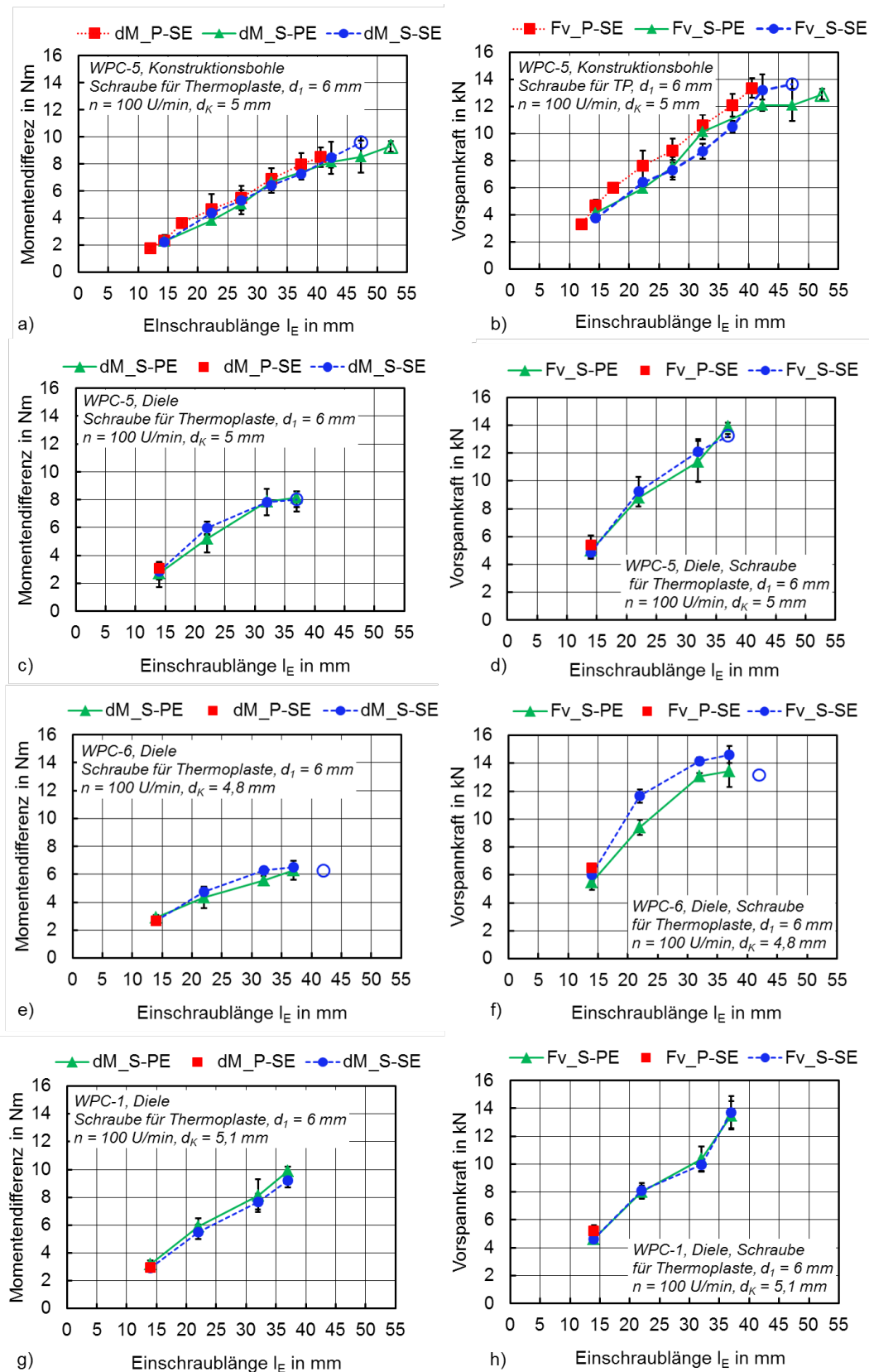


Bild A 2: Montageparameter im Überdrehversuch bei minimierter Kopfreibung mit variabler Einschraublänge, in den Werkstoffen WPC-5 (a, b, c, d), WPC-1 (e, f) und WPC-6 (e, f). Leere Punkte = Schraubenbruch M_{SB} , Materialfeuchtigkeit = 1,5%, $N = 5$.